

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**STUDIUM TEPELNÝCH POMĚRŮ ENERGETICKÉHO  
ZÁSOBNÍKU PRO DLOUHODOBÉ UKLÁDÁNÍ  
ENERGIE V PODMÍNKÁCH KLIMATU ČR**

STUDY OF THERMAL RATIOS OF ENERGETIC STORAGE FOR LONG-TERM SAVING  
ENERGY IN CLIMATE OF CZECH REPUBLIC

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Martin Kožík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK,  
CSc.**

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Martin Kožík
<b>Název</b>	Studium tepelných poměrů energetického zásobníku pro dlouhodobé ukládání energie v podmínkách klimatu ČR
<b>Vedoucí práce</b>	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2016
<b>Datum odevzdání</b>	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Davies, Morris, G., Building Heat Transfer, John Wiley 2004

Kupilík, V., Závady a životnost staveb, GRADA Publishing 1999

Halahyja, M., Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie, ALFA Bratislava 1986

DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. A Wiley Interscience Publication. 2. vydání, 1980. 762 s. ISBN 0-471-05066-0

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Energetické zásobníky pro dlouhodobé ukládání energie sehrávají ve stavebnictví stále větší roli, jde o důležitý problém řešení využívání energie z přírodních zdrojů. Úvahy ohledně použití tepelných zásobníků nemusí vyplývat ze složitých i nákladných technologií, významnou roli mohou z praktického hlediska sehrávat teplovodní zásobníky:

V rámci řešení bakalářské práce proveďte posouzení:

- i) sestavte přehled v současnosti dostupných typů energetických zásobníků,
- ii) proveďte specifikaci jejich funkčnosti, přehled jejich akumulační schopnosti s využitím citelného tepla, latentního tepla, reakčního tepla, případně jiných principů,
- iii) analyzujte fyzikální vlastnosti materiálů vhodných pro energetické zásobníky, proveďte jejich srovnání pro fungování reálného zásobníku,
- iv) sestavte bližší popis materiálového uspořádání energetického zásobníku s vodní náplní využitelné pro menší stavby pro bydlení,
- v) výpočtově specifikujte tepelné vazby mezi vybraným stavební objektem, například rodinným domem, oproti energetické kapacitě teplovodního zásobníku a potřebné velikosti kolektorové plochy pro zajištění potřebného množství tepelné energie,
- vi) posuďte energetickou účinnost hodnoceného teplovodního zásobníku pro dlouhodobé využití uložené energie a související předpokládané náklady pro realizaci konkrétního systému v podmínkách klimatu ČR.

Při vypracování bakalářské práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; praktická část do 20 % rozsahu; celkový rozsah do 40 stran včetně tabulek a grafů.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Teoretická část bakalářské práce se zabývá systémy, které umožňují přeměnu slunečního záření na tepelnou energii, kterou lze využít zejména k ohřevu užitkové vody nebo k vytápění budov. Nejvíce se uplatňují systémy, které využívají citelného nebo latentního tepla. V experimentální části je provedena simulace chování tepelného zásobníku na daný stavební objekt v podmínkách klimatu ČR.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Intenzita slunečního záření, akumulace, citelné teplo, latentní teplo, solární kolektor, zásobník tepla, teplonosné médium

## **ABSTRACT**

Theoretical part of bachelor's thesis deals with systems, which enable transformation of solar radiation to thermal energy. This energy can be used especially for domestic water heating or for heat the building. Most applied systems exploit sensible or latent heat. In experimental part is simulated behaviour of heat accumulator to the given building in climate of Czech Republic.

## **KEY WORDS**

Intensity of solar radiation, accumulation, sensible heat, latent heat, solar collector, heat accumulator, heat transfer medium

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Martin Kožík *Studium tepelných poměrů energetického zásobníku pro dlouhodobé ukládání energie v podmínkách klimatu ČR*. Brno, 2017. 55s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....  
podpis autora  
Martin Kožík

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Děkuji především svým rodičům a celé své rodině, že mi byla oporou při psaní bakalářské práce. Také děkuji panu prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovi, CSc. za vstřícnost, odborné rady a ochotu při vedení mé bakalářské práce. V neposlední řadě všem zaměstnancům ÚTHD FAST VUT BRNO, kteří mi v průběhu studia byli nápomocní.

# Obsah

<b>I. Úvod</b> .....	9
<b>II. Teoretická část</b> .....	10
1. Sluneční energie .....	10
1.1. Využití sluneční energie .....	10
1.2. Intenzita slunečního záření .....	11
2. Základní součásti solárního systému .....	13
2.1. Solární kolektory .....	13
2.2. Tepelné zásobníky .....	17
2.2.1. Základní kritéria tepelných zásobníků .....	17
2.2.2. Typy energetických zásobníků .....	19
2.2.2.1. Podle zapojení přívodu a odběru pracovní látky .....	19
2.2.2.2. Podle časových parametrů akumulace .....	22
2.2.2.2.1. Krátkodobé zásobníky .....	22
2.2.2.2.2. Dlouhodobé zásobníky .....	25
2.3. Další komponenty solárního systému .....	28
2.3.1. Potrubí .....	28
2.3.2. Čerpadlo .....	29
2.3.3. Pojistná zařízení .....	30
3. Principy akumulace tepla .....	31
3.1. Akumulace s využitím citelného tepla .....	31
3.2. Akumulace s využitím latentního tepla .....	37
3.3. Akumulace s využitím reakčního tepla .....	43
<b>III. Experimentální část</b> .....	44
1. Klimatické podmínky .....	44
2. Intenzita přímého slunečního záření .....	44
2.1. Energie získaná z intenzity přímého záření .....	45
3. Vybraný objekt k simulaci .....	46
4. Dimenzování energetického zásobníku .....	49
5. Energetická účinnost teplovodního zásobníku .....	50
6. Ekonomická bilance systému pro dlouhodobé ukládání energie .....	51
7. Diskuse výsledků .....	51
<b>IV. Závěr</b> .....	52
<b>V. Použitá literatura a zdroje</b> .....	53
<b>VI. Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	55



## I. Úvod

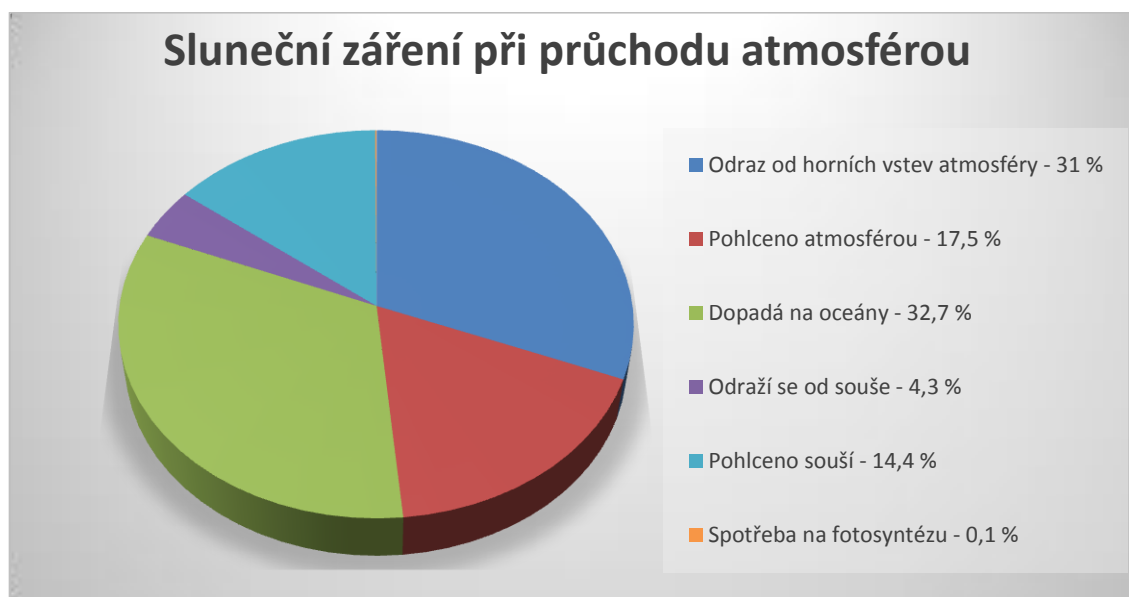
V současné době při výstavbě nových stavebních objektů se také přihlíží k jejich energetické náročnosti. Cílem je, aby provoz nově realizovaných objektů byl co nejlevnější a ekologický. V takových provozech se využívá vydatný obnovitelný zdroj energie, kterým je Slunce. Sluneční energie ovšem není na zemi dodávána nepřetržitě. Vzhledem k střídání dne a noci vlivem otáčení země se sluneční záření dostává ve sluneční dny k danému povrchu na Zemi v průměru cca 8 hodin denně. Při nepříznivém počasí se sluneční záření k povrchu Země nemusí dostat vůbec. Z tohoto důvodu je potřeba energii ze slunečního záření ukládat (akumulovat) na dobu, kdy nebude k dispozici. K akumulování sluneční energie slouží solární soustavy, které se skládají ze solárních kolektorů, zásobníku, potrubí a dalších komponentů. Energie je uchována v zásobníku, ve kterém jsou využívány akumulace s využitím citelného tepla, které využívá především tepelnou kapacitu látek, nebo latentního tepla, kde nastává fázová přeměna daného média především mezi kapalným a pevným skupenstvím. Pro správný chod a vysokou účinnost solární soustavy je potřeba správně dimenzovat velikost zásobníku a montáž potřebné plochy solárních kolektorů. Podstatné je také znát chování počasí v průběhu roku, které samozřejmě není každý rok stejné, ale chová se přinejmenším podobně.

Cílem bakalářské práce je vypracovat řešerši o komponentech solární soustavy. Především budou popsány tepelné zásobníky a solární kolektory. Tepelné zásobníky lze rozdělit podle časových parametrů akumulace na dlouhodobé a krátkodobé. Popsány budou jednotlivé typy, které jsou v současnosti používány. Následně podrobněji rozebrané principy akumulace energie. V praktické části je cílem simulovat tepelný zásobník s vodou k vybranému objektu s ohledem na ekonomickou stránku systému.

## II. Teoretická část

### 1. Sluneční energie

Sluneční energii lze definovat jako proud elektromagnetického záření, které je vysíláno z povrchu Slunce na osvětlenou stranu země. [1] Patří do skupiny takzvaných obnovitelných zdrojů. To znamená, že bude k dispozici neustále. Výhodou je, že její využití má minimální dopad na životní prostředí a je k dispozici zcela zdarma. Termonukleární reakce, která se odehrává v Slunce jádru při teplotě  $1,5 \cdot 10^7$  K, je zdrojem energie Slunce. Podstatou reakce je přeměna atomů vodíku na atomy hélia. Při této přeměně se uvolňuje velké množství energie, které je předáváno ve formě elektromagnetického záření do kosmického prostoru. Ovšem jen malé procento záření se střetne se zemským povrchem. [2]



Graf 1 – Sluneční záření při průchodu atmosférou, zdroj [1]

Nad horní hranicí zemské atmosféry (ve výšce satelitů) je naměřen proud energie o hodnotě přibližně  $1360 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ . Tato hodnota je označována jako tzv. **solární konstanta**. Reálná hodnota ovšem není konstantní, protože trajektorie oběžné dráhy Země kolem Slunce je ve tvaru elipsy, a to je příčinou odchylek do velikosti 3 %. [2] [3]

#### 1.1. Využití sluneční energie

Značným konzumentem sluneční energie je samotná Země a její flora i fauna. Pokud dochází k ohřívání atmosféry a povrchu Země, nastávají klimatické procesy jako oceánské

nebo vzdušné proudění, vypařování a déšť. Díky těmto procesům je na Zemi udržováno takové klima, které je vhodné pro život lidí, rostlin i živočichů.

Člověk se snaží využít sluneční energii k výrobě jiného druhu energie několika způsoby, které závisejí na druhu vyráběné energie. Nejvíce se však využívá pro vytápění objektů pomocí solárních soustav, jejichž hlavní části jsou solární kolektory a energetický zásobník. Dále ji lze využít pro výrobu elektrické energie v solárních elektrárnách nebo prostřednictvím koncentrování slunečních paprsků dochází k ohřevu pracovního média tepelných motorů s vnějším přestupem tepla. [1]

### Systémy využití sluneční energie

**a) Přímé využití** – Slunečními paprsky dopadne na povrch země přibližně  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Tuto energii lze využít přímo na:

- ohřev užitkové vody,
- vytápění,
- výroba elektrické energie (fotovoltaický článek),
- v zemědělství (skleníkový efekt).

**b) Nepřímé využití** – Sluneční energie se může v přírodě přeměňovat na:

- potenciální energie vody (vodní elektrárny),
- kinetická energie vzdušných mas (vítr),
- chemická energie biomasy.[2]

### 1.2. Intenzita slunečního záření

Intenzita slunečního záření na povrchu Země je množství sluneční energie v kWh, která dopadá na  $1 \text{ m}^2$  daného povrchu. Ovlivňuje ji především zeměpisná šířka, ale i průměrné počasí a množství oblačnosti v dané lokalitě. Celková intenzita slunečního záření dopadající na plochu pod vrstvou atmosféry je součtem přímého a difuzního záření. [1]

$$I = I_D + I_P$$

kde:  $I$  je celková intenzita slunečního záření [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  
 $I_P$  je intenzita přímého slunečního záření [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  
 $I_D$  je intenzita difuzního slunečního záření [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]. [1]

- **Difúzní záření** – sluneční záření, které bylo odraženo od částeczek obsažených v atmosféře, jako jsou např. vodní kapky nebo prach, a změnilo svoji trajektorii. Celková hodnota difúzního záření je závislá na oblačnosti a znečištění atmosféry.
- **Přímé záření** – sluneční záření, které při průchodu atmosférou nebylo odraženo ani pohlceno a znovu vyzářeno. [1]

Soubor přímého a difúzního záření se nazývá globální záření. V letním období tvoří difúzní záření asi 50 % globálního záření. V zimě je jeho podíl značně vyšší díky oblačnému počasí. V celoročním průměru tvoří difúzní záření asi 60 % veškerého záření. Proto je vhodné využívat technologie, které umí dobře využít i tento typ záření.

Jestliže se zvyšuje podíl vodní páry v atmosféře a také je vyšší podíl difúzního záření, tím více energie globálního záření ubývá. V pravé poledne je intenzita záření:

- za zamračených dnů 40 až 200  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,
- za jasných dnů 600 až 1000  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Účinkem otáčení Země a jejího oběhu ve sluneční soustavě okolo Slunce během roku nastává výkyv záření na povrch země, protože se střídá den a noc i ročních období. Severní polokoule v zimě přijme méně energie, protože jsou zkráceny dny a slunce se pohybuje níže na nebi. Úbytek slunečního záření při účinném vlivu globálního větrného systému v našich podmínkách vedou k chladnému zimnímu počasí s nepatrnými hodnotami solárního záření. Na jižní polokouli je tomu naopak. [3]

**Tabulka 1 - specifických výkonů zářivé energie a podílu difúzního záření za různých podmínek**

Počasí	Záření [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Difúzní podíl [%]
Modré nebe	800 – 1000	10
Zamlžené nebe	600 – 900	až 50
Mlhavý podzimní den	100 – 300	100
Zamračený zimní den	50	100
Celoroční průměr	600	60

Zdroj [3]

Velký výkyv množství slunečního záření je důvodem vzniku základního problému v technickém využívání sluneční energie. Pro konkrétní návrh realizace solární soustavy je nutné znát nabídku slunečního záření v konkrétních hodnotách. K měření takových hodnot

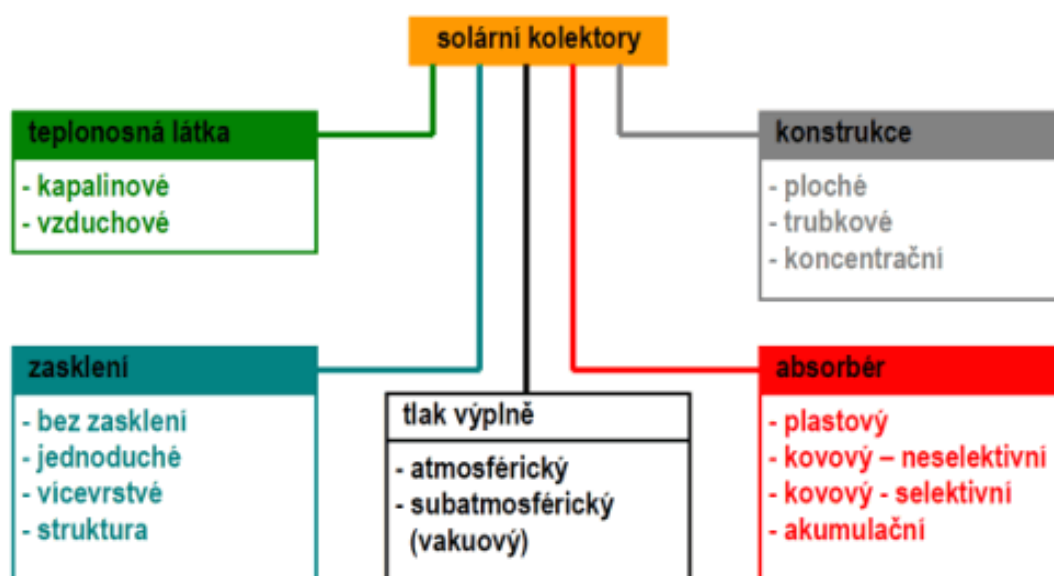
slouží především meteorologické stanice kdekoli na světě. Měřeny jsou především 2 nejzajímavější hodnoty slunečního záření. **Délka slunečního záření**, která je měřena za hodinu, měsíc nebo rok a **zářivá energie na vodorovnou plochu**, která je vyjádřena jako suma za den nebo měsíc globálního záření měřená ve  $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ . [3]

## 2. Základní součásti solárního systému

### 2.1. Solární kolektory

Solární kolektor je aparát, jehož funkcí je pohlcovat sluneční záření a měnit ho v tepelnou energii. Ta je následně předávána teplotnosné látce, která protéká kolektorem. Jeho velmi dobrá tepelná izolace přispívá ke zlepšení funkce a účinnosti kolektoru. Na vrchní straně je transparentní kryt vyrobený ve většině případů ze skla nebo polykarboxylátu, který propouští krátkovlnné sluneční záření, ale znemožní zpětné vyzařování dlouhovlnného záření. Na spodní straně a bocích je absorber izolován klasickými izolačními materiály, jako jsou minerální vlákna nebo pěnový polyuretan. Na povrchu absorberu se difuzní i přímé záření mění na teplo. Povrch musí mít schopnost co nejvíce dopadajícího slunečního záření přeměnit na teplo a přitom z něj minimum vyzařit zpět. [3] [4] [5]

Celý systém je opatřen tuhým rámem, který slouží jako ochrana proti mechanickým vlivům a vlhkosti. Teplo je odváděno z kolektoru teplotnosným médiem v potrubí, které také vyžaduje dostatečnou izolaci až do místa potřeby např. solárního zásobníku. [5]



Obrázek 1 – Schéma rozdělení solárních kolektorů. Zdroj [4]

Solární kolektory, ve kterých se využívá kapalina jako teponosná látka, jsou uplatňovány pro jednoznačnou většinu aplikací v budovách. Vzduchové kolektory jsou v České republice využívány pouze zřídka pro předehřev čerstvého vzduchu, větrání nebo oběhového vzduchu k cirkulaci vytápění. Solární kapalinové kolektory lze rozdělit podle řady hledisek. Na obrázku 1 lze vidět konstrukční kombinace, které jsou využívány v praxi. [4]

### **Plochý neselektivní kolektor**

Zasklený deskový kolektor, který obsahuje kovový absorbér, se spektrálně neselektivním povlakem např. černým potěrem. Jsou využívány především k sezonnímu předehřevu vody při nízké teplotní úrovni, protože vykazují značné tepelné ztráty vlivem sálání v zimním období. [4]

### **Plochý nekrytý kolektor**

V drtivé většině případů se jedná o plastovou rohož, která není zasklená, s velkými tepelnými ztrátami. Tepelné ztráty takového kolektoru závisí na venkovních podmínkách (nejvíce na rychlosti proudění větru). V praxi se uplatňují hlavně jako sezónní ohřev bazénové vody o nízké teplotní úrovni. [4]



Obrázek 2 – Fotografie bazénových absorbérů jako rohože. Zdroj [4]

### **Plochý selektivní kolektor**

Jedná se o zasklený deskový kolektor s kovovým absorbérem se spektrálně selektivním povlakem. Na boční a zadní straně kolektorové skříně je opatřen tepelnou izolací. Nevykazují příliš velké tepelné ztráty sáláním, a proto jsou využívány především pro solární ohřev vody a vytápění celoročně. Tvoří největší procentuální podíl zasklených kolektorů na trhu. [4]

### Plochý vakuový kolektor

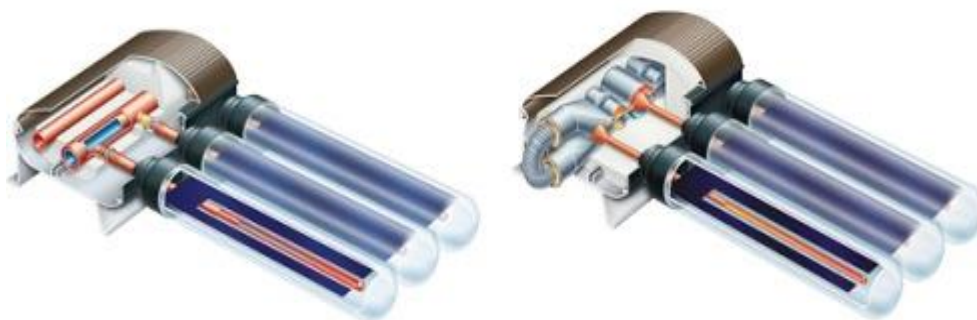
Zasklený deskový kolektor s kovovým absorberem se spektrálně selektivním povlakem. Tlak uvnitř kolektoru je nižší než atmosférický tlak v okolí kolektoru, aby byly zajištěny nízké celkové tepelné ztráty. Tyto kolektory jsou využívány pro celoroční solární ohřev vody, vytápění nebo případně pro průmyslové aplikace s provozními teplotami okolo 100 C. [4]



Obrázek 3 – Fotografie plochého atmosférického (vlevo) a plochého vakuového kolektoru (vpravo). Zdroj [4]

### Trubkový jednotěnný vakuový kolektor

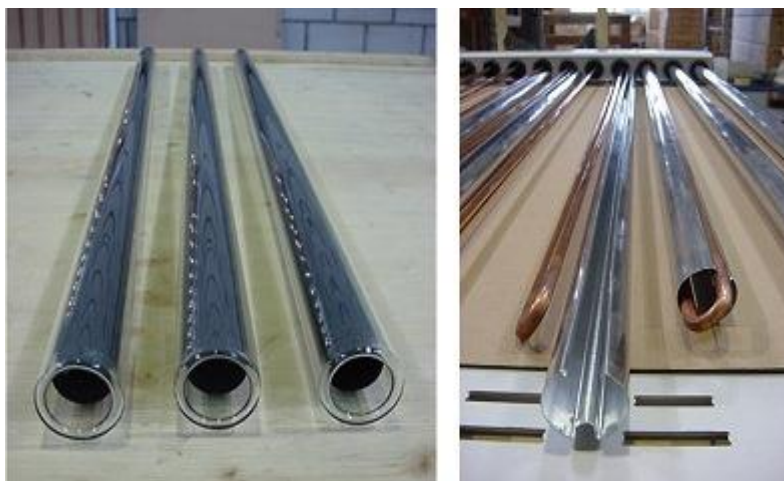
Jedná se o kolektor s plochým spektrálně selektivním absorberem, který je umístěn ve vakuové skleněné trubce. Vzhledem k tomu, že je absorbér nízkoemisivní a díky vakuové izolaci se výrazně redukuje tepelné ztráty. Vysoký přesun tepla z absorberu do teplonosného média skrze svařovaný spoj znamená vysokou účinnost kolektoru v celém teplotním rozsahu. V praxi nachází uplatnění především pro kombinované soustavy pro vytápění nebo průmyslové vysokoteplotní aplikace (teploty vyšší než 100 °C). [4]



Obrázek 4 – schémata trubkových jednotěnných vakuových kolektory s přímo protékáním koncentrickým potrubím (vlevo), s tepelnou trubicí (vpravo). Zdroj [4]

### Trubkový dvojstěnný vakuový kolektor (Sydney)

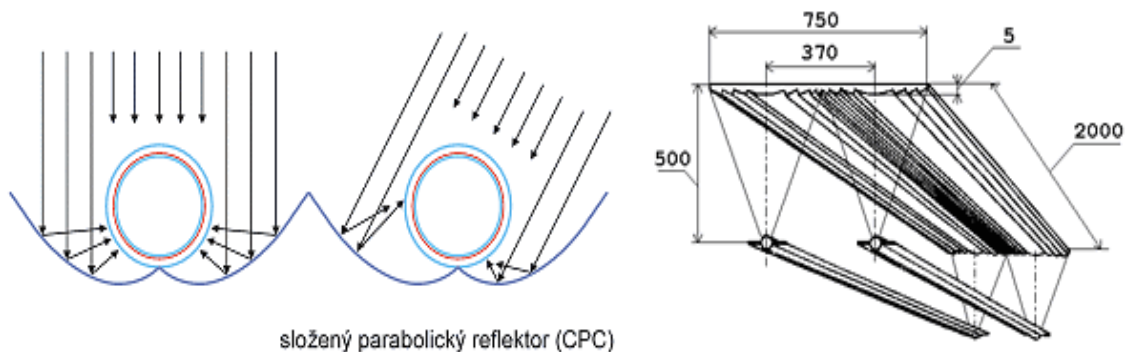
Kolektor s válcovým spektrálně selektivním absorberem, který je umístěn do vakuované trubice. Oproti plochým kolektorům mají nižší účinnost při nízkých teplotách. Je to způsobeno problematickým přenosem tepla z absorpční trubky do teplotonosné kapaliny prostřednictvím teplosměnné lamely. Využívány jsou především pro kombinované soustavy pro vytápění a průmyslové vysokoteplotní aplikace (provozní teploty na 100 °C). [4]



Obrázek 5 – Fotografie trubkový dvojstěnný vakuový kolektor na bázi Sydney trubek. Zdroj [4]

### Soustředující (koncentrační) kolektor

Specifický typ kolektoru, ve kterém je využito zrcadel, čoček nebo jiných optických prvků, jejichž funkce je usměrňovat a soustředit přímé sluneční záření, které prochází aperturou kolektoru, do ohniska (absorbéru) o zřetelně menší ploše než je vlastní plocha apertury. Aby bylo možné účinné použití koncentračních kolektorů, musí být dostatek energie z přímého slunečního záření během roku. [4]



Obrázek 6 – Schéma koncentračních solárních kolektorů pro aplikace v budovách. Zdroj [4]



## 2.2. Tepelné zásobníky

Tepelný zásobník má za úkol vyrovnávat přirozené kolísání dodávek solární energie. Je navržen na požadované využití solární energie. Společně s kolektorem je součástí solárního okruhu. Solární kolektor přeměňuje sluneční záření na teplo a převádí ho do teplotnosného média (např. vody, vzduchu aj.), aby mohlo být transportováno k danému místu spotřeby. V každém systému pro ohřev vody nebo vytápění musí být zařazen vhodný zásobník, který zachová tepelnou energii na dobu, kdy ji budeme potřebovat. [6]

Ideální by byl takový, aby přijal všechno teplo, které bylo vyprodukováno kolektorem a udržel by ho jakkoliv dlouhou dobu a navíc bez tepelných ztrát. Byl by malý a cenově dostupný. Existence takového zásobníku by byla revolucí v celém energetickém průmyslu. [3]

### 2.2.1. Základní kritéria tepelných zásobníků

#### Kapacita zásobníků

Kapacita zásobníků je především záležitostí média pro akumulaci a na způsobu, kterým bude akumulace uskutečněna. Ve většině případů je možno rozlišovat mezi chemickou a termickou akumulací. Chemická akumulace je častá formě topného oleje, plynu nebo benzínu. Typy těchto paliv v sobě mají chemicky vázanou energii, která se uvolní spálením. Proces chemického uvolňování energie se dosud nepodařilo obrátit pomocí technik ve vhodných mezních podmínkách a účinnostech. Proto se pro uchování tepla používají jen termické (tepelné) zásobníky. Tyto můžeme rozdělit na zásobníky s využitím **latentního** tepla a tepla „**citelného**“. Citelné nebo sensibilní teplo znamená, že při přívodu tepla se teplota zásobníku zvýší a při odběru tepla klesá. Latentní teplo využívá fázovou přeměnu materiálů, při které se uvolňuje velké množství tepla při stejné teplotě přeměny. [3]

#### Velikost zásobníku

Potřebný objem zásobníku se řídí denní spotřebou vody a při vytápění podle navrhovaných otopných těles. Objem zásobníku je závislý především na druhu akumulovaného teplotnosného média. Pro toto měření má největší význam měrná tepelná kapacita daného média. Nejčastější velikosti solárních zásobníků v domovní technice se uplatňují v rozmezí 150 až 1000 litrů objemu. Na základě empirického pravidla by měla být brána v úvahu zásoba na 1,5 až dvojnásobek denní potřeby. Tím se solární zásobníky

stávají větší než zásobníky teplé vody u konvenčních topných soustav, které jsou dimenzovány pro jednodenní nebo i menší zásobu teplé vody. [3]

### **Tepelné ztráty**

Tepelné ztráty jsou neúmyslným vedlejším jevem při zacházení s citelným teplem. Nastávají především v čase, kdy médium v zásobníku dosáhlo vyšší teploty než okolí. Čím větší jsou rozdíly teplot média a okolí, tím větší jsou tepelné ztráty. [3]

Abychom redukovali tepelné ztráty je nezbytné celou plochu povrchu izolovat bez mezer, spár a tepelných mostů. Velice vhodná a smysluplná je nejméně 10 cm izolace (pro sezónní zásobníky je vhodná izolace s tloušťkou větší než 50 cm). Jako izolační hmota by měla být použita vysoce hodnotná hmota o tepelné vodivosti  $0,040 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  nebo méně. Nejčastěji v úvahu přicházejí minerální vlákna nebo polyuretanová pěna (bezfreonová). Izolační materiál musí plně přiléhat na stěnu zásobníků beze spár. Všechna potrubí, obzvláště sloužící k odběru teplé vody, musí být také zaizolována s vyloučením tepelných mostů i ztrát konvekci vlivem samotížné cirkulace a vedena pokud možno dolů, v každém případě ale se sklonem od zásobníku. [3]

V případě, že budou všechna tato pravidla bezpečně dodržena, je stejně velmi pravděpodobné, že část akumulované energie bude povrchem zásobníku ztracena. Tudiž se i bez odběru tepla po jistém čase víceméně vybijí. Velikost takových tepelných ztrát závisí na velikosti povrchu i rozdílu teplot mezi zásobníkem a okolím [3]

### **Bezpečnost zásobníku**

Při značném intenzivním slunečním záření a chybějícím odběru teplé vody (např. v létě) se může teplota v zásobníku vyšplhat na nevhodně vysokou hodnotu. Podle okolností může dojít až k nebezpečným hodnotám. Pokud teplota v zásobníku přesáhne  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , přináší to velké nebezpečí opaření a při teplotách nad  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  nastává riziko tvorby páry, které může vést k otevírání pojistného ventilu. Proto je nutné brát v úvahu opatření, které bude omezovat nárůst teploty v zásobníku nad  $98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . [3]

V současných systémech je smysluplný omezovač teploty zásobníku. Jeho hlavní funkcí je zabránění usazování vápníku (vodního kamene) na výměníku tepla při jeho teplotách nad  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Další funkcí je jištění zásobníku před nadměrným nabitím. Pokud teplota v zásobníku nabývá kritických hodnot, omezí se teplota např. odpojení čerpadla. [3]

## 2.2.2. Typy energetických zásobníků

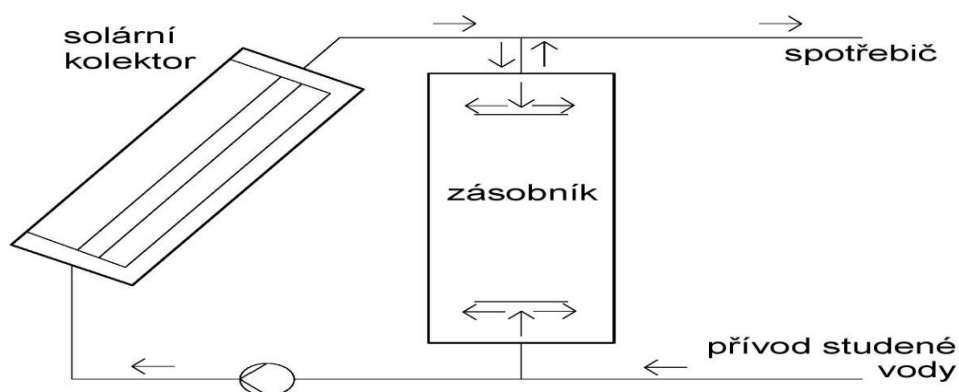
### 2.2.2.1. Podle zapojení přívodu a odběru pracovní látky

Velký vliv na tepelné vrstvení vody uvnitř zásobníku mají jevy, které probíhají při nabíjení a vybíjení. Tedy při přísunu tepla a jeho odběru, které následují u tepelných zásobníků dvěma cestami. Nepřímo pomocí **tepelného výměníku**, nebo přímo pomocí **přitékající a odtékající vody**. [3]

#### Zásobník s přímým nabíjením a vybíjením

Jedná se o jednodušší případ. Teplo je do zásobníku dodáváno shora formou horké vody. Studená voda je odebírána zdola a přiváděna ke zdroji tepla například do kolektoru. Horká voda se pohybuje v zásobníku shora dolů jako nějaký píst. Tento proces probíhá při nabíjení. Při vybíjení nastává proces opačný. Pro dobré vrstvení musí studená nebo horká voda proudit vodorovným směrem. Toho lze docílit konstrukčními opatřeními například plechovými zarážkami proudění. [3]

Velkou výhodou tohoto systému je jeho jednoduchost a cenová dostupnost. Do kolektoru neustále proudí studená voda. Z tohoto důvodu nenastávají na přívodním potrubí do kolektoru žádné tepelné ztráty. Ovšem tento typ zásobníku disponuje i nevýhodami. Solární okruh a zásobník nejsou při přímém nabíjení od sebe odděleny. Z tohoto důvodu nesmí být v solárním okruhu využíván mrazuvzdorný prostředek. Systém není v zimě funkční, protože musí být vyprázdněn. Je vhodný pouze pro klimatické zóny, ve kterých se teplota nedostává pod bod mrazu. Uplatnění nachází ve středomoří. [3]



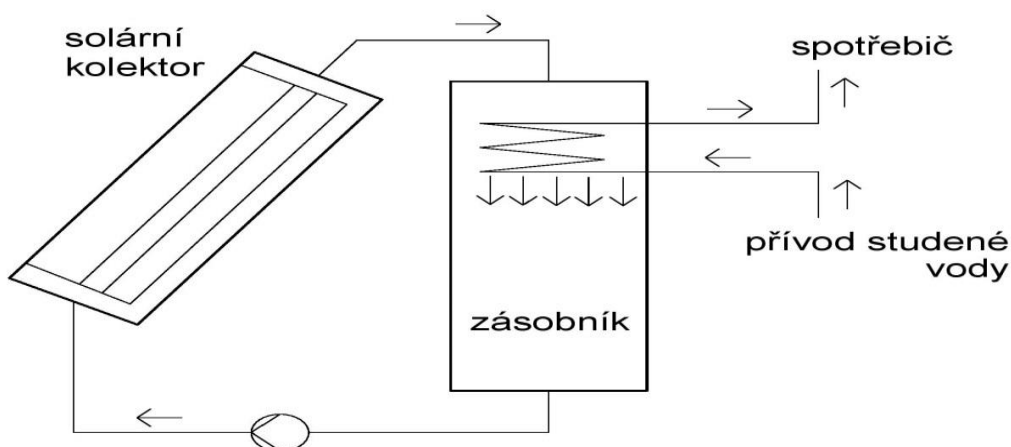
Obrázek 7 – Schéma zásobníku s přímým nabíjením a vybíjením. Zdroj [3]

### Zásobník s přímým nabíjením a nepřímým vybíjením

Při tomto typu zásobníku probíhá odběr přes tepelný výměník horní, horké části zásobníku. Ochlazením při vybíjení vzniká v zásobníku směrem dolů mířící konvenční proudění. To znamená, že ochlazená kapalina „padá“ dolů. Takový proces vede k promíchání obsahu zásobníku. Výhodami tohoto uspořádání jsou:

- Zásobník nemusí podléhat relativně vysokému tlaku zapojením do vodovodní sítě (4 až 6 bar),
- Vlastní zásobník pitné vody v odběrném tepelném výměníku má omezenou velikost. Tudíž se vytváří jen málo nepříjemných záležitostí se zárodky mikroorganismů.

Na každém zásobníku s tímto systémem vznikají ztráty způsobené teplotními rozdíly. Zatímco maximálně přenášený výkon v solárním okruhu je relativně nízký (cca  $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  kolektorové plochy), jsou na odběrné straně požadavky uživatelem vysoké špičkové výkony. Při průtoku 10 l/min je vyžadován výkon tepelného výměníku cca 20 kW. Velmi výkonné výměníky jsou na místě pro takový systém. I voda v zásobníku musí být o 5-10 °C teplejší, než je požadováno na výtoku. [3]

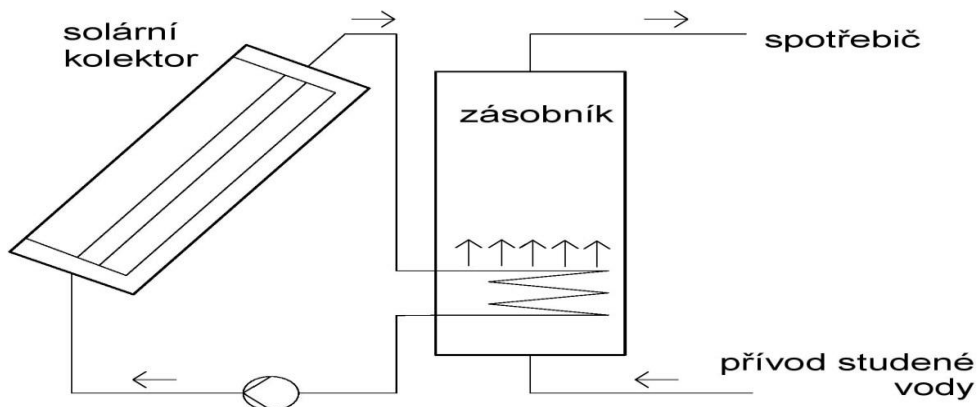


Obrázek 8 – Schéma zásobníku s přímým nabíjením a nepřímým vybíjením. Zdroj [3]

### Zásobník s nepřímým nabíjením a přímým vybíjením

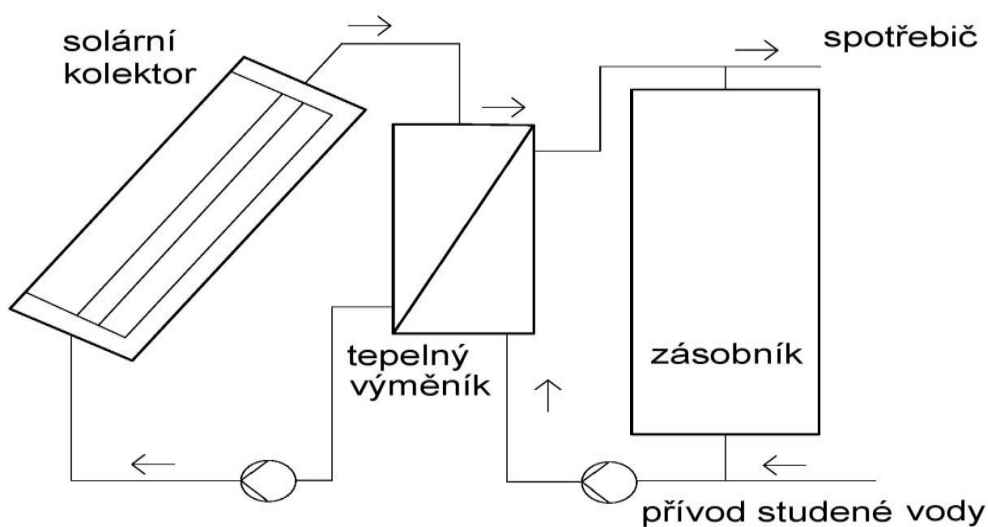
Nejvíce využívaný zásobník pro přípravu teplé vody ve střední Evropě. Jeho spotřební okruh je oddělen od solárního okruhu se směsí vody s prostředkem proti zamrznutí. Tím je dáno, že umožňuje celoroční provoz i při mrazivém počasí. Na vnitřním

tepelném výměníku se uplatňuje při přívodu tepla do zásobníku vzhůru směřující konvenční proudění, které je důležitým faktorem ke spolehlivému promíchání při nabíjení. Oproti tomu vybíjení následuje po vrstvách. [3]



Obrázek 9 - Schéma zásobníku s nepřímým nabíjením a přímým vybíjením. Zdroj [3]

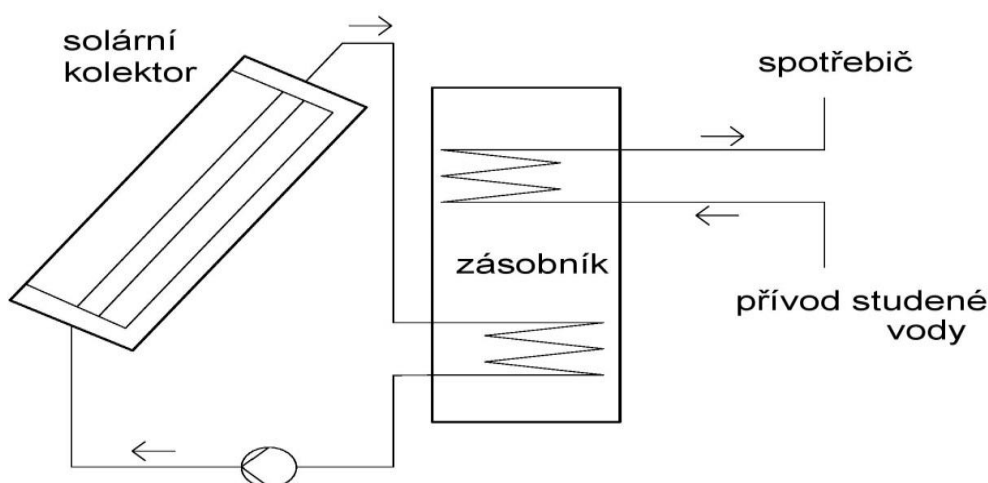
Zvláštní případ reprezentuje uspořádání systému dle obrázku 10. Zásobník má vhodné charakteristiky přímého nabíjení a vybíjení, i když solární a zásobníkový okruh je od sebe separován. Zde musí přijít úvahu dodatkové tepelné ztráty zásobníku i vyšší nároky na propojení potrubím jakož i zapojení druhého čerpadla. Proto jsou zásobníky s venkovním tepelným výměníkem využívány především u větších soustav. [3]



Obrázek 10 - Schéma zásobníku teplé vody s nabíjením přes vnější tepelný výměník. Zdroj [3]

### Zásobník s nepřímým nabíjením a vybíjením

V tomto případě je realizován jak přívod tepla i jeho odběr pomocí jednoho tepelného výměníku, což je příčinou charakteristických vlastností při nabíjení a vybíjení. Voda v zásobníku je oddělena od solárního i spotřebního okruhu. Tím pádem může být využita i pro další okruh jako například pro vytápění. Je využíván více u solárních soustav s podporou vytápění než pro samostatný ohřev vody. [3]



Obrázek 11 - Schéma zásobníku s nepřímým nabíjením a vybíjením. Zdroj [3]

#### 2.2.2.2. Podle časových parametrů akumulace

Principy ukládání tepla se člení podle patřičného fyzikálního principu. Využívá se především citelné teplo, latentní teplo nebo termochemické reakce. V klimatických podmínkách České republiky jsou významnější krátkodobé zásobníky, které pracují s překlenutím jednoho až několika dnů. [7]

##### 2.2.2.2.1. Krátkodobé zásobníky

U krátkodobých zásobníků se využívá citelného i latentního tepla. Hovoříme-li o velkých solárních soustavách (nad 50 – 100 m<sup>2</sup> kolektorové plochy), potom zásobníky jsou nádoby buď tlakové nebo beztlaké. Ze solárního okruhu dochází k přestupu tepla v deskových výměnících, které jsou vždy situované mimo vlastní nádobu. Objemy zásobníků se pohybují nejvýše v řádech desítek m<sup>3</sup> a teploty pokaždé do 100 °C. Výhodou je vysoký měrný prostup tepla. Tím je zajištěna nízká cena teplosměnné plochy. [7]

- **Tlakové zásobníky**

Pro solární přípravu teplé vody jsou využívány především zásobníky s přímým napojením na studenou vodu z vodovodní sítě. Z materiálového hlediska se pro realizaci používá jen ocel, popřípadě ušlechtilá ocel. Jelikož voda v nádrži při ohřevu nabývá na objemu, musí být tlak v tlakových nádržích omezen na přípustnou hodnotu pojistným ventilem. Při překročení přípustného tlaku se ventil otevře a nechá vodu z nádrže odtéct. Voda odtéká až do doby, kdy je dosažena žádaná tlaková hodnota. Pro přípravu teplé vody se nejčastěji používán ocelový zásobník s nepřímým nabíjením a přímým vybíjením. [3]

- **Beztlaké zásobníky**

Jejich předností je, že je lze zhotovit poměrně jednodušeji a s nižšími náklady oproti tlakovým zásobníkům. Za stejnou cenu lze uskladnit v beztlakém zásobníku dvakrát až pětkrát více energie. Často mohou být využity i nádrže používané v jiných oborech, které jsou dostupné jako výrobek z hromadné výroby (např. nádoby na topný olej nebo sudy z nápojového průmyslu). [3] [7]

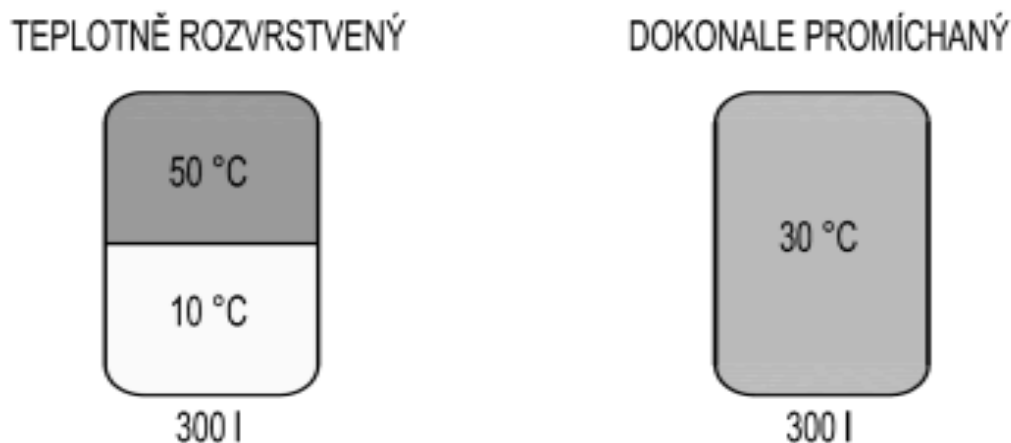
Velmi rozšířené jsou beztlaké zásobníky v jižních zemích, kde neklesá teplota pod bod mrazu. A to nejen v bezprostředním spojení se solárními kolektory, ale lze se s nimi setkat i střechách domů jako zásobníky na pitnou vodu. Zvláště výhodné jsou tam, kde je potřebné velké množství energie. [3]

- **Stratifikační (vrstvený) zásobník**

Zásobník, ve kterém dochází ke gravitačnímu rozvrstvení vody podle měrné váhy (teplot). Každá vrstva si pak dále udržuje rozdílnou teplotu, protože tepelná vodivost je poměrně nízká. Při posuzování účinnosti zásobníků bylo zjištěno, že ve srovnatelných poměrech má stratifikační zásobník vyšší účinnost (47 %) oproti homogennímu zásobníku (43 %). Uváděný zásobník byl jen třívrstvý. U vícevrstvého zásobníku lze očekávat účinnost ještě vyšší. [7]

K tepelnému vrstvení dochází v čase, kdy je teplá voda ukládána do správné části zásobníku a odběr prováděn vždy ze spodní části. Tepelné rozvrstvení se udrží do doby, než nastane promíchání vrstev. Výměna tepla mezi jednotlivými vrstvami je ztížena z důvodu malé tepelné vodivosti vody. Rozhodující vliv na tepelné vrstvení zásobníku mají jevy, které probíhají při nabíjení a vybíjení [7]

Nabíjení zásobníku solární energií pomocí vnitřního výměníku ve spodní třetině výšky je lehce realizovatelné. Má ovšem nevýhodu v tom, že prouděním ohřáté vody dochází vždy také k promíchání vrstev. Tepelné ztráty zásobníku jsou zřetelně zvyšovány přirozeným prouděním topného média do rozvodů, kde se ochlazuje a stejným potrubím je navraceno nazpět do zásobníku. K zabránění se využívá armatury nebo termosifónu. [7]



Obrázek 12 - Rozdíl mezi tepelně rozvrstveným a dokonale promíchaným zásobníkem. Zdroj [8]

Chladnější voda je těžší a klesá dolů, teplejší vstupá vzhůru. Pro správné fungování zásobníku je nutno vytvořit vrstvení podle teploty, ale také ho udržet. V solárních systémech toho lze dosáhnout správnou konstrukcí teplotního rozvrstvení.

Faktory, které ovlivňují tepelné promíchávání zásobníku:

1. Přívod teplé vody,
2. Štíhlost zásobníku (poměr výška/šířka),
3. Tepelné ztráty zásobníku,
4. Odběr teplé vody, přívod studené vody,
5. Vertikální vedení tepla ve stěně zásobníku,
6. Nízká tepelná vodivost. [2]

- **Kombinovaný zásobník**

Tento typ zásobníku je kombinací zásobníku na pitnou vodu a vyrovnávacího zásobníku. Menší nádrž, plněná pitnou vodou, je pevně vestavěna do horní „horké“ části



vyrovnávacího zásobníku. Tím je dosaženo jednoduchého oddělení pitné vody od vody „technické“, přičemž je teplo z této vody převáděno do vody pitné. [3]

#### **2.2.2.2.2. Dlouhodobé zásobníky**

Jelikož během celého roku dopadá sluneční záření nerovnoměrně na zemský povrch, je v zimě, kdy je potřeba tepelné energie na vytápění největší, zachyceno nejméně solární energie. Kvůli tomuto jevu solární soustava, která by měla dodávat teplo pro vytápění, vyžaduje dlouhodobé ukládání tepla ze solárních kolektorů. Akumulace se provádí pomocí speciálních sezónních zásobníků. [2]

Národní výzkumné aktivity směřovaly nejprve ve Švédsku k realizaci projektů se sezónním principem zásobníků tepelné energie. Výzkumy v Německu nebyly finančně zvládnutelné. Tím pádem nebyly uskutečněny. Doporučilo se patřičné aktivity zesílit a dále pracovat na dalších konceptech zásobníků, jejichž cíl byl dosáhnout zvýšení účinnosti a snížení nákladů. [7]

Obrovským krokem vpřed se stalo založení „skupiny VII“ v IEA (Mezinárodní agentura pro energii) v roce 1979. To vedlo v letech 1980 až 1985 ke vzniku několika ještě dnes používaných zařízení. V Německu roku 1982 byl zřízen první dlouhodobý zásobník s říčním šterkem ve městě Stuttgart. [7]

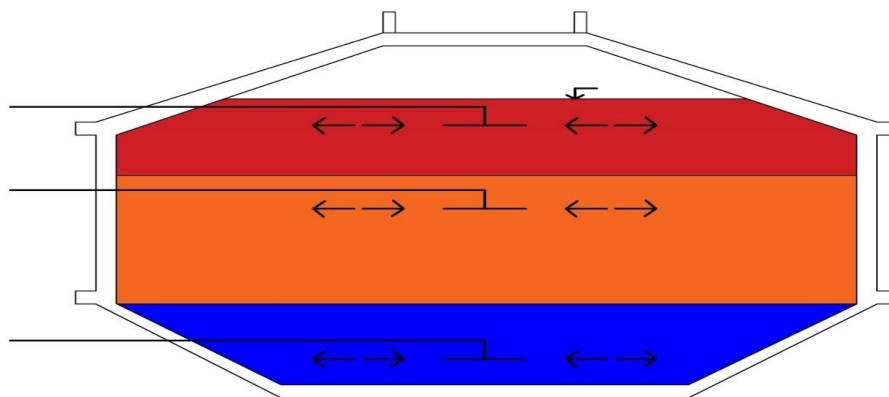
První projekty s dlouhodobým ukládáním energie byly zhotoveny teprve v posledních 25 letech. Při jejich provozu média dosahovaly teploty od 30 °C do 95 °C. Pro sezónní zásobníky mohou být využíván kromě vody také zeminy. V ní je nainstalovaný topný trubkový registr, který v době přebytku tepla zeminu ohřívá a v době nedostatku tepla zemině teplo odnímá. Realizace určitého typu zásobníku závisí na místních poměrech, na objemu a zvláště geologických a hydrogeologických poměrech zeminy v dané lokalitě. Ke snížení tepelných ztrát je nezbytnou součástí konstrukce zásobníku i tepelná izolace. [7]

- **Teplovodní zásobník**

Jedná se o zásobník, který má nejuniverzálnější možnosti. Nezávisle na geologických poměrech může být nasazen i pro menší konstrukce (například jako zásobník na několik dní nebo týdnů). Čistě vodní zásobníky potřebují přirozenou nosnou konstrukci jako štolu nebo jeskyni. Ty ale nejsou ve většině případů k dispozici. U velkých sezónních zásobníků

používá jako hlavní stavební materiál železobeton. Jsou částečně zabudovány do země, případně integrovány do krajiny.

K zabezpečení vodotěsnosti se používají směsi speciálních betonů. Pokud není možno zabezpečit zásobník speciální směsí betonu, je potřeba jej izolovat, protože pracuje bez tlaku v rozsahu 30 °C až 95 °C. První vyrobené zásobníky byly projektovány s obložením nerezavějící oceli. Jelikož byly dlouhou dobu problémy s těsněním nerezavějícího obalu, začal výzkumný program, jehož cílem byl vývoj téměř nepropustného betonu pro vodní páru. Ten by mohl převzít funkci nosiče i izolantu. U převážně cylindrických zásobníků se navrhuje izolace o tloušťce 200 mm až 300 mm. [9]



Obrázek 13- Schéma teplovodního zásobníku [9]

Alternativu k betonové konstrukci představují zásobníky z umělých hmot. Jsou posilovány skelnými vlákny. Pilotní zásobník s touto technologií je od roku 1998 úspěšně v provozu.

V zásobníku se má užívat rozdělení do teplotních vrstev. Zřízení k přivádění a odběru tepelného média jsou zhotoveny ve formě odrazného talíře, jehož funkce je zamezení promíchávání obsahu zásobníku. [9]

- **Zásobník se štěrkem a vodou**

Pro tento typ zásobníku je zásobním médiem směs štěrku (také písku nebo zeminy) a voda. Výhodou je, že na rozdíl od vodního zásobníku nepotřebuje žádné nosné stropní konstrukce. Po stranách a nahoře jsou zásobníky izolovány. Podle objemu a hloubky zásobníku se uvažuje i izolace pod zásobníkem. Materiál, kterým se izoluje pod

zásobníkem, musí splňovat danou tlakovou pevnost. „Nabíjení“ a „vybíjení“ se uskutečňuje při menších objemech. Zpravidla nepřímo přes uložené hadice z umělé hmoty. Ovšem tento proces lze uskutečnit i přímou výměnou vody. U obou variant je potřeba sledovat, aby se v zásobníku podařilo vytváření teplotních vrstev. [9]

Zásobník se šterkem a vodou musí mít asi o 50 % větší objem než čistě vodní zásobník tepla, aby mohl uložit stejné množství tepelné energie (za předpokladu stejného teplotního rozdílu). Je to dáno vysokým podílem šterku, který představuje 60 až 70 % objemu. Jeho teplotní kapacita je nižší oproti vodě. [9]

- **Zásobník ze zemních sond**

Jako teplonosné médium zde slouží zemina. Jedná se o horninové vrstvy v přirozeném stavu podloží. Přínos tepla do podloží je prováděn U-formovanými nebo koaxiálními teplonosnými trubkami, které jsou zavedeny do svisle vrtaných děr o průměru 100 až 200 mm. Prostor mezi trubkami a stěnami sond musí být vyplněn vhodným materiálem. Nejvhodnějšími materiály jsou směsi bentonitu, písku, cementu a vody. Nejběžnější hloubky vrtů se pohybují v rozmezí 20 až 100 m. Rozteče vrtů mezi 1,5 až 3 m. [9]

Transport tepla zásobníkem probíhá sdílením tepla. Zemní zásobníky mohou být vybaveny tepelnou izolací, osazenou do několika metrů nad horním okrajem zásobníku. Tepelné ztráty v neustáleném stavu mohou při menších zásobnících (až do 50 000 m<sup>3</sup>) činit až 50 %. Stupeň využití zásobníku vlivem značné proměnlivé působnosti okolního podloží se zvyšuje jen pozvolna. V prvních pěti letech fungování je nutno počítat s většími ztrátami, než později v ustáleném stavu provozu. Vhodnými geologickými formacemi pro sondový tepelný zásobník jsou vodnaté jíly nebo jílovce, které vykazují vysokou tepelnou kapacitu a současně jsou velmi hutné (těsnící). Tím účinně zamezují možným pohybům podzemní vody. [9]

- **Tepelný zásobník Aquifer**

Jako Aquifer zásobníky se označuje kyprá nebo pevná hornina, v jejích pórech či rozsedlinách se může pohybovat voda. Teplo může být zaváděno do tohoto zásobníku studničními vrty a obrácením směru proudění zase odebíráno k použití. Výměna vody, speciálně při teplotách nad 50 °C může vést k lokálním změnám biologických a

geochemických vlastností podloží změnami rovnovážnosti roztoků minerálních solí. Některé sloučeniny mohou dosáhnout stavu značného přesycení a vylučovat se v pevné formě. To vede v technologii vodního oběhu k zanášení a poruchám při provozu.

Aquifery blízké povrchu jsou upřednostněny pro využití pitné vody. Typické hloubky vrstev leží spíše 100 m pod horní linií terénu. Jelikož tento typ zásobníku není možno izolovat, má smysl zásobník provozovat na vysoké teplotě pouze při velkém akumulacním objemu (minimálně 100 000 m<sup>3</sup> uzavřeného objemu). [9]

## 2.3. Další komponenty solárního systému

### 2.3.1. Potrubí

Pro přenos tepla mezi zásobníkem a kolektorem je zapotřebí potrubí, které musí materiálem a světlostí odpovídat danému účelu. Pro výběr materiálu potrubí je potřeba znát velikost soustavy a další podstatnou roli hraje i materiál, z kterého je vyhotoven absorbér, protože nelze kombinovat např. hliníkové absorbéry s měděnými trubkami. Pro solární systémy lze uvažovat materiály pro potrubí:

- měděné trubky,
- ocelové trubky,
- trubky z polyetylenu.

V současné době jsou nejčastěji používané měděné potrubí. Lze použít trubky z měkké i tvrdé mědi, ale ve většině případů dostává přednost tvrdá měď díky její přizpůsobivosti. Tento typ potrubí má nízkou drsnost, a proto zpravidla neovlivňuje součinitel třecí tlakové ztráty. Lze jej jednoduše spojit pájením nebo lisovanými spoji. Nevýhodou je vysoká cena. [10]

Ocel je vhodná především při použití ve velkých solárních soustavách. Práce s ocelí je dost náročná, ale na druhou stranu soustavy vykazují velkou odolnost. V praxi se lze setkat se dvěma typy ocelových potrubí. **Ocelové bezešvé**, které vykazuje vyšší drsnost než měděné. Vyhotovení mezi jednotlivými trubkami probíhá pomocí svařování. Nejsou vhodné pro solární soustavy, protože jejich povrch je pozinkovaný. Jsou naopak cenově výhodné, zvláště při větších světlostech. Druhý typ potrubí je z **nerezové oceli** tzv. „vlnovec“. Montáž je rychlá a jednoduchá. Trubky jsou ohebné a tvarovatelné. Cenově se řadí mezi dražší. [10]

Plastové potrubí se pro použití v solárních soustavách neosvědčily. Hlavním důvodem je, že nejsou vhodné pro obrovské zatížení při chodu solární soustavy naprázdno. Rovněž nejsou vhodné pozinkované trubky, protože při styku zinku s glykolem, který je nejčastěji používaný do teplotnosných kapalin, dochází k vytváření bahnitě sraženiny.

Při montáži je třeba si uvědomit, že potrubí musí být navržena tak aby:

- Cesta mezi kolektorem, zásobníkem a místem spotřeby byla co nejmenší,
- Potrubí vedlo co nejsuššími místy a izolace byla co nejméně pracná,
- Byl dostatek místa pro izolace,
- Všechna místa, kde by mohla vzniknout vzduchová kapsa, musí být odvzdušněna,
- Aby bylo možno celý systém úplně vyprázdnit.



Obrázek 15 – Fotografie měděného potrubí (vlevo) a nerezového potrubí (vpravo). Zdroj [11]

Tepelné izolace potrubí musí odolávat v blízkosti kolektoru minimálně 170 °C a u vzdálenějších míst minimálně 120 °C. EPDM pěny a syntetický kaučuk mají nízkou tepelnou vodivost, jsou nenasákové s uzavřenou strukturou. Jejich teplotní odolnost je 170 °C krátkodobě a 130 °C dlouhodobě. Skelná a minerální vata mají odolnost vůči UV záření. Jejich struktura je otevřená, proto je třeba uzavírat do krytu. Jejich dlouhodobá odolnost vůči teplotě je maximálně do 280 °C. Pokládání potrubí je při realizaci solárních systémů jednou z nejdůležitějších činností. Rozložení a izolace potrubí mnohdy rozhoduje o tom, jak bude solární systém fungovat. [10]

### 2.3.2. Čerpadlo

V solárních systémech s nuceným oběhem jsou všeobecně používána obvykle **čerpadla oběhová** používaná pro ústřední vytápění. Jsou osvědčené a spolehlivé.

Zvládnou dostatečný objem kapalin a mají vysokou tepelnou odolnost až do 110 °C. Nemají problém čerpat vodní směsi s mrazuvzdornými přísadami. [12]

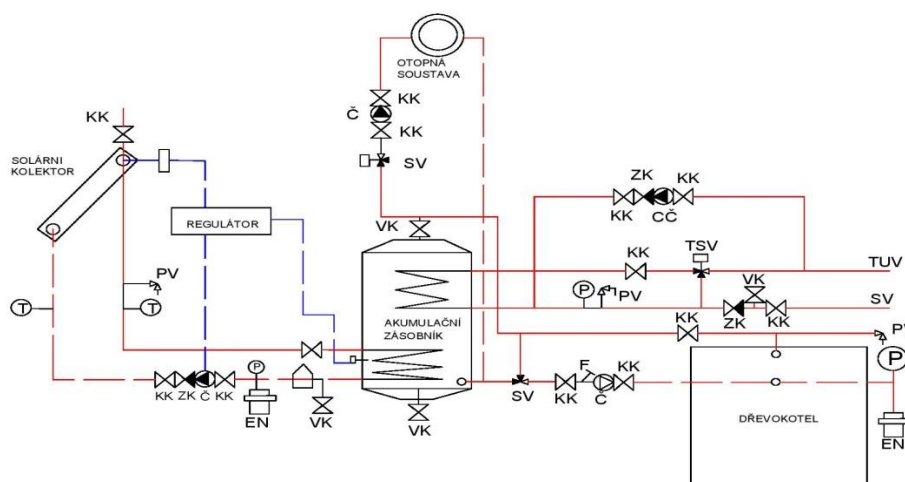
### 2.3.3. Pojistná zařízení

Tyto zařízení se využívají v solárních soustavách s uzavřeným okruhem, kde jsou potřeba zabezpečovací mechanismy, které v případě poruchy dokážou snížit tlak v soustavě. Neexistují žádné normy pro jejich návrh v solárních soustavách. Takové funkce plní:

- Pojistný ventil,
- Expanzní nádoba.

Pojistný ventil chrání primární okruh solární soustavy proti nedovolenému tlaku. Musí být umístěn v pojistném úseku a pravidelně kontrolován. Expanzní nádoba umožňuje změny objemu teplotnosné kapaliny vlivem tepelné roztažnosti bez nedovoleného zvýšení tlaku a zbytečných ztrát kapaliny způsobených otevřením pojistného ventilu. Obecně pojistná zařízení zabrání i vlastnímu poškození soustavy a proto by každá soustava měla mít dostatek těchto prvků. [10]

### Schéma solární soustavy



Obrázek 16 – Schéma solárního systému pro ohřev vody a vytápění domu. KK – kulový kohout, CČ – cirkulační čerpadlo, Č – čerpadlo, EN – expanzní nádoba, F – filtr, P – tlakoměr, PV – pojišťovací ventil, SV – směrovací ventil, T – teploměr, TSV – termostatický ventil, VK – vypouštěcí kohout, ZK – zpětná klapka [13]

### 3. Principy akumulace tepla

Akumulací tepla rozumíme hromadění tepelné energie, kterou chceme uchovat po stanovenou dobu a následně ji využít v době, kdy ji nejvíce potřebujeme. K uchování tepelné energie slouží energetické zásobníky. Podle typu akumulační látky a využití podle fyzikálních vlastností a principu lze akumulaci rozdělit na akumulaci s využitím **citelného** nebo **latentního** tepla a **chemických reakcí**.

#### 3.1. Akumulace s využitím citelného tepla

Tento typ akumulace využívá především tepelné kapacity látek, které po dobu akumulace nemění své skupenství. Akumulovaná energie je přímo závislá na počáteční a konečné teplotě. Nejčastěji používané médium je voda, protože má vysokou měrnou tepelnou kapacitu. Ovšem akumulačních materiálů je v dnešní době mnoho. Můžou to být např. vzduch, olej, granit, parafin a mnoho dalších. Každý z materiálů má svoje výhody a nevýhody, ale při výběru teplonosného média rozhoduje tepelná kapacita a dostupný prostor pro ukládání energie. Akumulaci s využitím citelného tepla lze popsat následující matematickou rovnicí:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot \rho \cdot c \cdot dt = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2)$$

kde:  $V$  je objem pracovní látky [ $\text{m}^3$ ],  
 $\rho$  je hustota pracovní látky [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $c$  je měrná tepelná kapacita pracovní látky [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  
 $t_{1,2}$  jsou teploty na počátku a na konci uvolňování tepla [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $Q$  je teplo [J]. [2]

#### Voda jako teplonosné médium

Voda je dnes nejvíce využívána jako tepelně-akumulační materiál, který pracuje v intervalu teplot od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $100^{\circ}\text{C}$  bez změny skupenství. Vhodnými materiály pro sestavení energetického zásobníku s vodou jsou nerezová ocel, beton, plasty nebo vodotěsné materiály. Takové zásobníky jsou běžně izolovány izolačními materiály s nízkou tepelnou vodivostí za účelem snížit jejich tepelné ztráty. Materiál i zařízení uvnitř zásobníku, které obklopuje voda, musí snést stejné teploty, ve kterých se pohybuje pracovní interval vody. Tepelný obsah uložené horké vody v charakteristickém teplotním

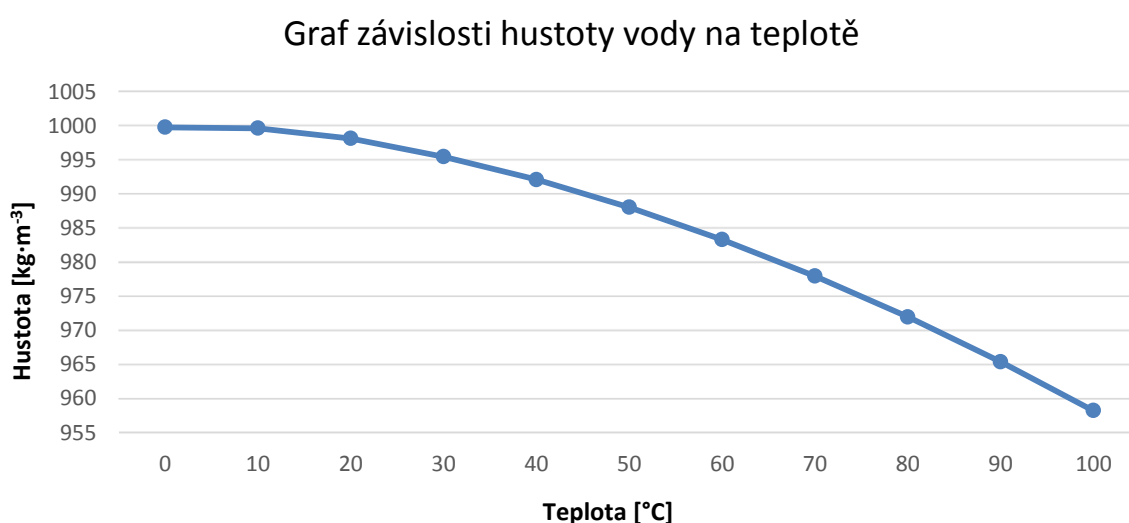
intervalu od  $T_{min}$  do  $T_{max}$  je určen tepelnou kapacitou a daným teplotním rozdílem ( $T_{max} - T_{min}$ ). Tepelné ztráty zásobníku s horkou vodou musí být tak malé, aby byla zachována vysoká účinnost. [14]

Účinnost většiny systémů, které využívají citelné teplo vody, se může zvyšovat, pokud mají zabudovány velké teplotní rozvrstvení při nabíjení i vybíjení tepelnou energií. Mimoto, by se mělo teplotní rozvrstvení v systému zachovávat i mimo fáze nabíjení a vybíjení. Například zásobník s velkým teplotním rozvrstvením vody zajišťuje, že teplota příslušného solárního kolektoru se snižuje. Z tohoto důvodu se zvyšuje výkon solárního kolektoru. [14]

Fyzikální vlastnosti vody se mění v závislosti na její teplotě. Jedná se především o měrnou tepelnou kapacitu, hustotu a součinitel tepelné vodivosti.

### Hustota vody v závislosti na teplotě

Se zvyšující se teplotou se snižuje hustota vody. Ovšem tento jev neplatí pro teploty od 0 do 4 °C, protože v tomto intervalu hustota vody narůstá. Největší hustotu má voda při 3,98 °C. To znamená, že voda se chová jako ostatní kapaliny až od 3,98 °C. Tento jev se nazývá anomálie vody, která se uplatňuje v přírodě. Na dně jezer nebo rybníků se vyskytuje voda s touto teplotou a je po celý rok konstantní. Tím umožňuje život vodních živočichů. Při měření hustoty vody v závislosti na její teplotě můžeme naměřit spoustu výsledků, které se mohou lišit, protože ne v každé lokalitě je složení vody stejné.



Graf 2 – Závislost hustoty vody na teplotě. Zdroj [14]



Obecně lze hustotu vody v závislosti na teplotě spočítat dle následujícího vztahu:

$$\rho = 1000,6 - 0,0128 \cdot T^{1,76}$$

kde:  $T$  je teplota vody [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $\rho$  je hustota vody [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Zdroj [14].

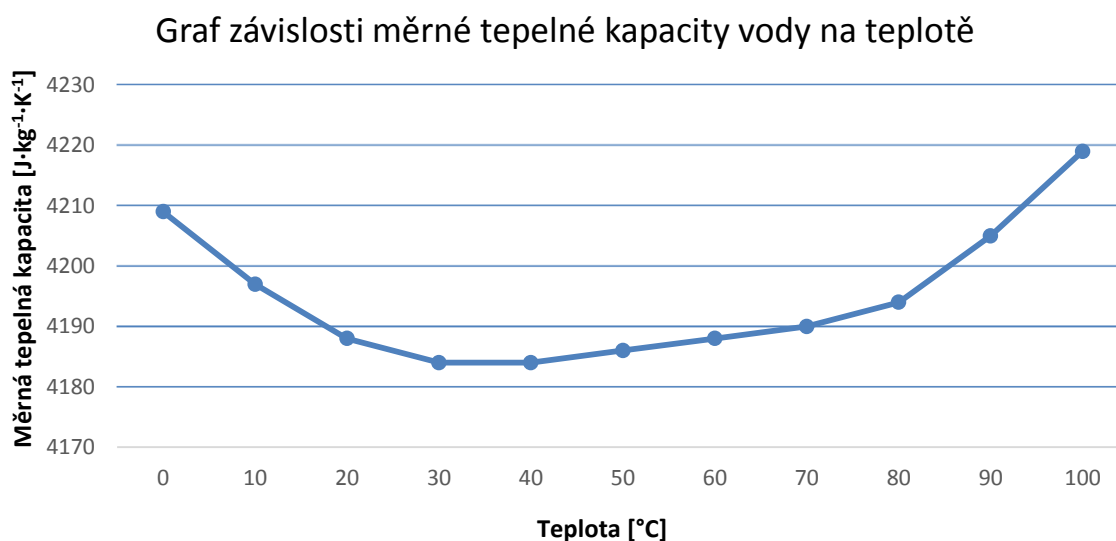
### Měrná tepelná kapacita vody v závislosti na teplotě

Měrná tepelná kapacita udává, kolik množství tepla je potřeba na ohřátí 1 kg dané látky o 1 teplotní stupeň. Průběh grafu závislosti měrné tepelné kapacity na vodě udává, že při ohřevu vody do cca  $30^{\circ}\text{C}$  až  $40^{\circ}\text{C}$  nepatrně klesá hodnota měrné tepelné kapacity. Při následném ohřívání přes  $40^{\circ}\text{C}$  naopak mírně narůstá. Běžně se v literaturách používá hodnota měrné tepelné kapacity vody  $4182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Obecně lze měrnou tepelnou kapacitu vody v závislosti na teplotě vyjádřit rovnicí:

$$c = 4209,1 - 132,8 \cdot 10^{-2} \cdot T + 143,2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$$

kde:  $T$  je teplota vody [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $c$  je měrná tepelná kapacita vody [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Zdroj [14]



Graf 3 – Závislost měrné tepelné kapacity vody na teplotě. Zdroj [14]

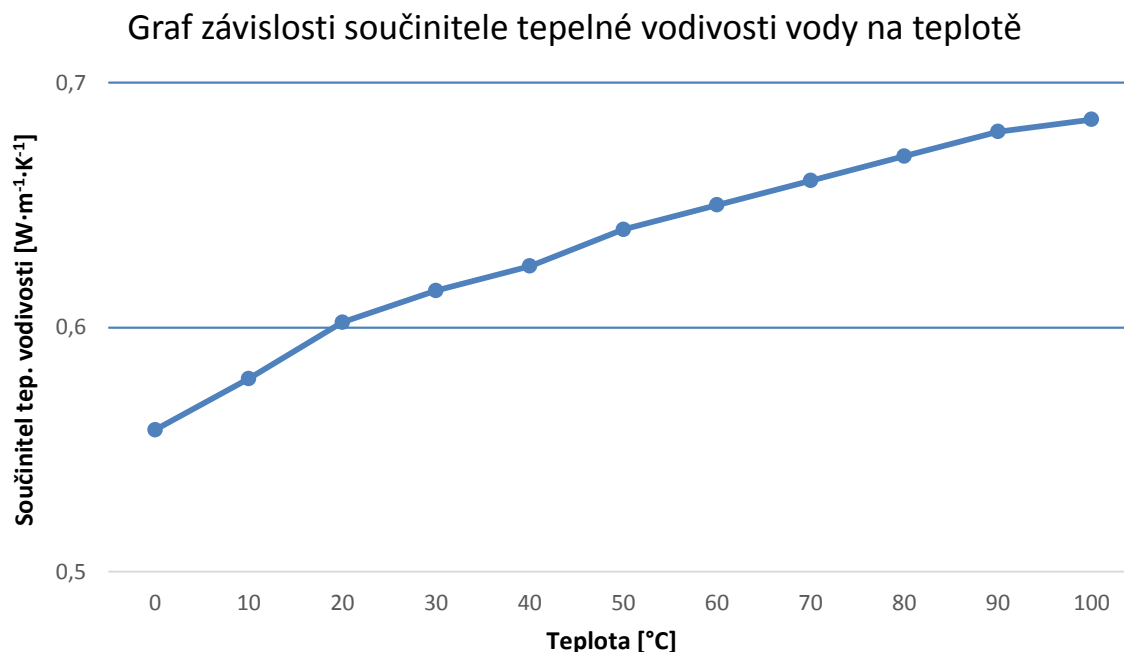
### Součinitel tepelné vodivosti vody v závislosti na teplotě

Obecně součinitel tepelné vodivosti je schopnost stejnorodého materiálu vést teplo. Čím menší hodnoty tepelné vodivosti má daný materiál, tím lépe je schopen vést teplo. Tento součinitel je závislý na více faktorech. Mimo teploty je to např. vlhkost nebo objemová hmotnost. Za normálních podmínek se hodnota součinitele tepelné vodivosti vody pohybuje okolo  $0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Při ohřívání vody jeho hodnoty vzrůstají. U nejnižších teplot je nárůst strmější než u vyšších teplot, kde nárůst teplot nabývá vyšších hodnot pomaleji. Čím menší hodnoty tepelné vodivosti má daný materiál, tím lépe je schopen vést teplo. To znamená, že voda nevede teplo dobře. [15]

Průběh závislosti součinitele tepelné vodivosti vody na teplotě je znázorněný v grafu 4. Stejně jako u hustoty i měrné tepelné kapacity ho lze vyjádřit pomocí matematické rovnice:

$$\lambda = 0,520 + 0,0198 \cdot T^{0,46}$$

kde:  $T$  je teplota vody [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $\lambda$  je součinitel teplotní vodivosti vody [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].  
Zdroj [14].



Graf 4 – Závislost součinitele tepelné vodivosti vody na teplotě. Zdroj [14]

## Beton jako teponosné médium

Beton je občas používán hlavně díky tomu, že je levný a kdekoli dostupný. Jako teponosné médium může využívat své následující vlastnosti:

- Vyšší hodnota měrné tepelné kapacity,
- Dobré mechanické vlastnosti,
- Koeficient teplotní roztažnosti podobný jako ocel,
- Vysoká mechanická odolnost vůči cyklickému tepelnému zatížení.

Když je beton zahříván, dochází k řadě změn a reakcí, které ovlivňují jeho pevnost a další fyzikální vlastnosti. V případě, že je beton zahříván na 100 °C, odchází volně vázaná voda, jejíž množství je kolem 60 % z celkového množství vody obsažené v betonu. Zbývající složky vody jsou fyzikálně vázány v malých pórech nebo chemicky vázané. Tyto složky vody jsou vyloučeny při teplotách mezi 120 až 600 °C. Většina vody je uvolňována při 30 až 300 °C, kdy původní hmotnost betonu se se zredukuje o 2 až 4 %.

Odolnost betonu vůči teplotním cyklům závisí na koeficientech teplotní roztažnosti materiálů, které byli do betonu přidány při jeho výrobě. Nejčastěji přidávaným materiálem přidávaným do takový betonů pro lepší odolnost vůči teplotním cyklům je čedič, jehož teplota tavení se pohybuje okolo 1250 až 1350 °C. Občas jsou přidávány i ocelová vlákna, aby zabráňovali praskání při vyšších teplotách.

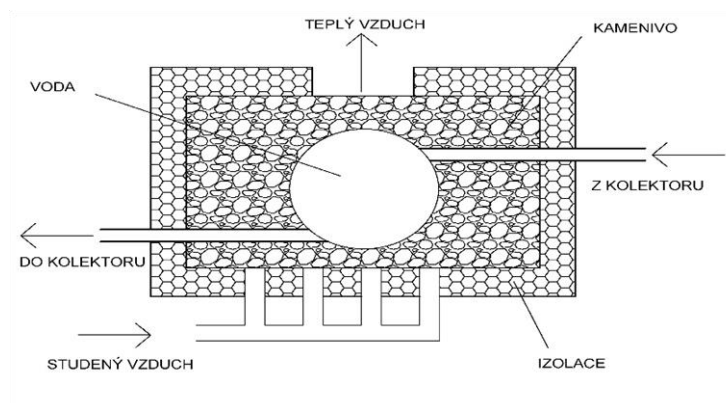
Betonová konstrukce, která slouží jako tepelné médium, může být zhotovena jako prefabrikát nebo monoliticky litá do navrhovaného bednění. Zda je výhodnější typ prefabrikátu nebo monolitu závisí na okolním prostředí. [14]

## Kamenivo jako teponosné médium

Kamenivo je levný a snadno dostupný materiál, který lze využít pro ukládání tepelné energie. Ovšem jeho měrná tepelná kapacita je o dost nižší než u vody. Naopak jeho výhodou oproti vodě je, že může využívat teplotu větší než 100 °C. Spojení vody a kameniva pro ukládání energie může být využito v mnoha ohledech. Například mohou být využity ve spojení s tepelnými čerpadly ke zlepšení efektivity rekuperace tepla.

Jednou z metod ukládání tepelné energie, která využívá kamenivo s vodou je metoda Harryho Thomasona. V tomto systému je zahřívána voda vstupem ze solárního kolektoru z vrchní části. Klesá při ochlazování a spodní částí je opětovně posílána do kolektoru.

Zásobník s vodou je obklopen kamenivem, přes které cirkuluje vzduch, který je ve vrchní části ohříván a proudí do příslušného objektu. Celý systém s vodou a kamenivem je obklopen izolací. [14]



Obrázek 17 – schéma systému Harryho Thomasona. Zdroj [14]

### Srovnání materiálů vhodných jako tepelné médium s využitím citelného tepla

Tabulka 2 – Fyzikální vlastnosti materiálů pro akumulaci tepla při 20°C

Médium	Rozsah teplot [°C]	Specifická tepelná kapacita [Wh·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Objemová tepelná kapacita [Wh/m <sup>3</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Objemová hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]
Voda	0 – 100	1,16	1160	4182	998
Vzduch	(-273) – 1000	0,28	0,31	1300	1,1
Olej	0 – 400	0,44 – 0,5	350 – 450	1850	800 – 900
Písek	0 – 800	0,2	360 – 390	960	1800 – 2000
Beton	0 – 500	0,24	460 – 560	880	1900 – 2500
Cihla	0 – 1000	0,23	330 – 440	840	1400 – 1900
Železo	0 – 800	0,13	1000	450	7850
Štěrkovodní zásyp	0 – 100	0,37	810	1840	2200

Zdroj [3]

Nejvíce využívaným materiálem pro tepelnou akumulaci s využitím citelného tepla je voda, která využívá své vysoké měrné tepelné kapacity, dostupnosti i ceně. Díky nízké objemové hmotnosti nepřenáší do konstrukce zásobníku takové zatížení jako ostatní materiály uvedené v tabulce. Na druhou stranu ji limituje rozsah teplot, v kterém je schopna pracovat. V tomto ohledu ji předčí téměř všechny v tabulce uvedené materiály, z nichž je to nejvíce cihla, písek nebo železo. Tyto materiály mají nízkou hodnotu měrné tepelné kapacity a vysoké objemové hmotnosti.

### 3.2. Akumulace s využitím latentního tepla

Teplu, které je daná látka schopna přijmout nebo odevzdat při změně skupenství se nazývá latentní teplo, které nevede k citelné změně teploty akumulčního média. Při změně skupenství dochází k naakumulování více energie než při akumulaci s využitím citelného tepla. Nejvíce využívaný přechod změny skupenství v praxi je přechod mezi kapalinou a tuhoun látkou. Změna skupenství z kapaliny na plyn nebo naopak se v praxi neuplatňuje. Důvodem je velká změna objemu akumulční látky při změně skupenství. Materiály, které se využívají při tomto typu akumulace tepla, se nazývají PCM (phase change materials) materiály. Akumulaci tepla s využitím latentního tepla lze popsat rovnici:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot dt + V \cdot \rho_t \cdot l_t + \int_{t_2}^{t_3} V \cdot \rho_k \cdot c_k \cdot dt = V \cdot [\rho_p \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) + \rho_t \cdot l_t + \rho_k \cdot c_k \cdot (t_3 - t_2)],$$

kde:

- $V$  je objem pracovní látky [ $\text{m}^3$ ],
- $\rho_{p,k}$  je hustota pracovní látky v pevném (kapalném) skupenství [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],
- $c_{p,k}$  je měrná tepelná kapacita látky v pevném/kap. skupenství [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
- $l_t$  je skupenské teplo tání/tuhnutí [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ],
- $t_{1,2}$  jsou teploty na počátku a konci jímání/uvolňování tepla [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $Q$  je teplo [ $\text{J}$ ],
- $t_t$  je teplota tání/tuhnutí [ $^{\circ}\text{C}$ ]. [2]

Při stejném rozdílu teplot může změna skupenství látek vzhledem k jímání a uvolňování latentního tepla poskytnout vyšší akumulční kapacitu oproti akumulaci citelného tepla. Tato výhoda se snižuje se při zvyšování rozdílu teplot. [15]

#### Provozní aspekty ukládání energie s využitím latentního tepla

S termodynamickou změnou fáze za konstantní teploty s absorpcí nebo uvolňováním latentního tepla se uplatňuje nejvíce přechod pevný – kapalný nebo pevný – pevný. Nejdůležitější kritéria, která musí materiály použité jako teplonosné médium při latentní akumulaci vykazovat, jsou:

- Vysokou entalpii při změně skupenství,
- Malé změny objemu při změně skupenství,
- Přiměřenou teplotu při změně skupenství ( $35 - 70^{\circ}\text{C}$ ),
- Chemickou stabilitu,
- Omezenou změnu objemu při změně skupenství,

- Musí být netoxické, nehořlavé. [15]

### PCM materiály

První experimentální aplikace PCM materiálů pro ukládání energie nastala v 70. letech 20. století na universitě Delaware ve městě Newark v USA. Pokud materiál taje, absorbuje teplo a pokud se mění v pevnou fázi (krystalizuje), uvolňuje teplo. PCM materiály mají výborné teplotně-fyzikální, kinetické a chemické vlastnosti. Mezi teplotně-fyzikální patří kromě těch, které jsou uvedeny výše v požadavcích na PCM materiály také:

- Vysoká tepelná vodivost v obou skupenstvích,
- Vysoká tepelná kapacita,
- Velké latentní teplo tání.

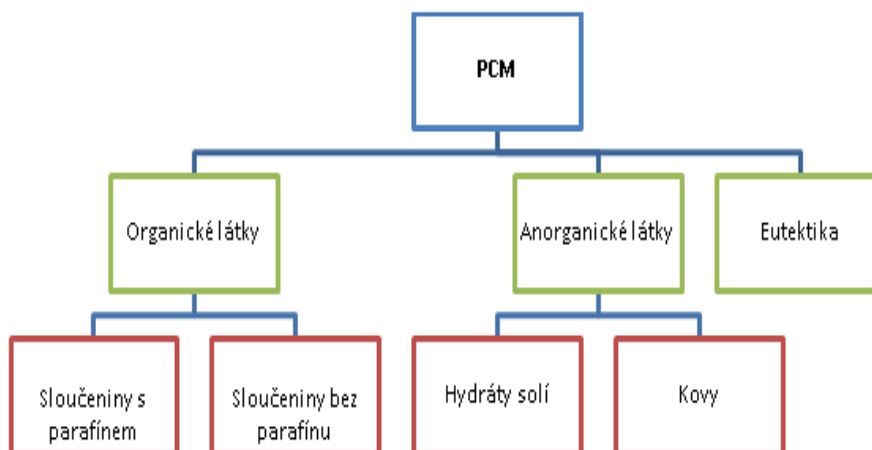
Z kinetických vlastností jsou to:

- Vysoká nukleace zabraňující přechlazení (jádra potřebná k vytvoření krystalizačních zárodků),
- Vysoká rychlost růstu krystalů.

K chemickým vlastnostem řadíme:

- Absolutně vratný cyklus krystalizace a tání,
- Stálost vlastností i s rostoucím počtem cyklů,
- Nesmí být korozivní ve vztahu k ostatním materiálům. [16]

### Rozdělení PCM materiálů:



Obrázek 18 – Schéma rozdělení PCM materiálů. Zdroj [16]

## Organické látky

Tato skupina PCM materiálu je členěna na sloučeniny s parafíny a na sloučeniny bez parafínů. Velkým plusem organických sloučenin je jejich vlastní nukleace. Tato vlastnost je příčinou toho, téměř nedochází k problémům s přechlázováním. [16]

- **Sloučeniny s Parafíny**

Parafín je směs pevných uhlovodíků řady  $C_nH_{2n+2}$ . Pro využití při skladování energie je nejčastěji využit téměř plný řetězec  $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ . Pro krystalizační řady ( $CH_3$ ) je nutné velké množství latentního tepla. Tato vlastnost je důvodem, proč jsou tyto sloučeniny velmi vhodné pro použití jako PCM. Další vynikající vlastnost parafínů je jejich chemická inertnost a cenová dostupnost. Na druhou stranu mají sloučeniny s parafíny poměrně dlouhý cyklus rekrystalizace-tání. [16]

- **Sloučeniny bez parafínů**

Kategorie sloučenin bez parafínu obsahuje velké množství organických látek, které mají odlišné vlastnosti. Tvoří tak velkou skupinu látek, které jsou vhodné k použití jako tepelné médium do tepelných zásobníků. Řadíme sem estery, vyšší mastné kyseliny, glykoly apod. Špatnou vlastností je jejich hořlavost, která neumožňuje jejich spolupráci s vyššími teplotami, plamenem a oxidačními činidly. Nejsou výhodné z finančního hlediska. Jejich cena je dvakrát až třikrát vyšší než u technických parafínů. [16]

**Tabulka 3 – organické látky s nejslibnějšími charakteristikami pro využití v tep. zásobících**

Kategorie	Název	Teplota tání [°C]	Latentní teplo tání [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
P	14 atomů uhlíku	5,5	228
P	16 atomů uhlíku	16,7	237
P	20 atomů uhlíku	36,7	246
NP	D-kyselina mléčná	26	184
NP	Trimyristin	33 – 55	201 – 213
MK	Kyselina octová	16,7	184
MK	Polyethen glykol 600	20 – 25	146
MK	Kyselina Palmitová	55	163
MK	Kyselina myristová	58	199

*Pozn. P – sloučeniny s parafíny, NP – sloučeniny bez parafínů, MK – mastné kyseliny.*

Zdroj [16]

## Anorganické sloučeniny

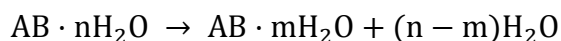
### a) Hydráty solí

Hydráty solí jsou látky, v jejichž struktuře disponují vázané (komplexně i hydratačně) molekuly vody. Tyto molekuly mají schopnost odštěpovat se při zahřívání. Schopnost poutat se zpět se děje při rozpuštění ve vodě. Při poutání molekul vody se u některých sloučenin uvolňuje tzv. hydratační teplo například:

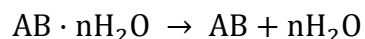


Tyto látky lze popsat obecným vzorcem  $\text{AB} \cdot n \text{H}_2\text{O}$ . Proces tání se jinými slovy nazývá dehydratace. Hydráty solí většinou tají do:

- Hydrátů s menším počtem molekul vody:



- Bezvodé formy:



Při změně skupenství z pevného na kapalné hydráty degradují do anhydrátů solí a vody nebo do hydrátu nižšího řádu a vody. Tento jev je velmi zásadní problém. Nekongruentní tání způsobuje, že malé množství molekul vody již nemá schopnost roztavit všechny látky pevného skupenství. Ty se vzhledem k větší hustotě propadají na dno. Tím se snižuje množství látek, které mění skupenství. Menší množství látek měnících skupenství snižuje pohlcené i uvolněné latentní teplo. [16]

Pro lepší funkci hydrátů se obecně doporučuje:

- Mechanické míchání, zapouzdření do kapslí,
- Přidání zahušťovadel, která zabrání sedání solí na dno,
- Napojení zásobníku na přívod vody. [16]

### b) Kovy

Kovy čekají na své výraznější uplatnění. Jejich problémem je vysoká objemová hmotnost. Disponují vysokým latentním teplem na jednotku objemu, ale nízkou latentní teplotou na kg. [16]



### c) Eutektické materiály

Eutektikum je směs dvou látek v pevném skupenství, jejichž krystaly vznikají spolu při tuhnutí. Čisté eutektikum se vytváří v míšicím poměru obou složek, při kterém je teplota tuhnutí směsi nejnižší. V případě, že je míšicí poměr odlišný, vzniká směs podeutektická, u které se tuhá fáze skládá ze směsi eutektika a krystalů jedné složky, nebo směs nadeutektická, jejíž tuhá fáze je vytvořena směsí eutektika a krystalů druhé složky. [16]

Eutektické směsi voda-sůl disponují podobnou tepelnou vodivostí jakou je charakterizována voda. Chemická stabilita je jednou z největších předností eutektik. Nevýhodou při jejich použití jsou korozivní vlastnosti. Objemová změna je během tání a krystalizace se pohybuje v rozmezí 5 až 10 %. [16]

**Tabulka 4 – Přehled vlastností vybraných materiálů eutektických směsí voda-sůl**

<b>Materiál</b>	<b>Teplota tání [°C]</b>	<b>Latentní teplo [kJ·kg<sup>-1</sup>]</b>	<b>Hustota (pevný) [kg·m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Hustota (kap.) [kg·m<sup>-3</sup>]</b>
KCl/H <sub>2</sub> O	-10,7	283	1126	1105
NaCl/ H <sub>2</sub> O	-21,2	222	1165	1108
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O	-30,6	131	1283	1251

Zdroj [16]

### Využití PCM jako stavební materiál

Kromě využití při ukládání tepelné energie se dají PCM materiály využít i jako staviva. Mnoho PCM materiálů nenašlo uplatnění na trhu, ale některé našli uplatnění, protože při jejich použití mohou snížit potřebu elektrické energie daného stavebního objektu. Jelikož u materiálů s fázovou přeměnou probíhá skupenská změna, nejčastěji z pevné látky na kapalinu je nezbytné zapouzdření těchto materiálů. Musí být prověřen problém s kompatibilitou mezi PCMs a kontejnerem a obal musí být dostatečně tepelně vodivý, aby byl schopen rychle přenášet teplo při vybíjení a nabíjení. [17]

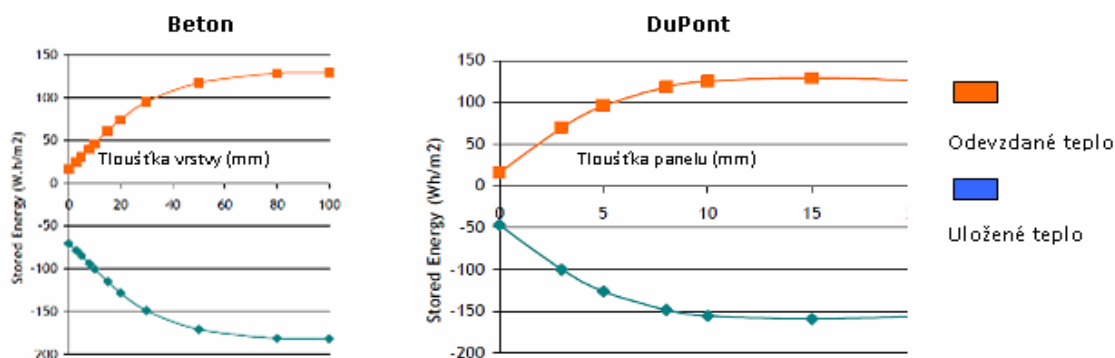
- **Obvodové stěny**

Užití PCM v obvodových systémech budov má za cíl zabránit přehřívání fasády, které je příčinou negativního vlivu na teplotu interiéru. Pro tento účel lze použít fasádní panely. Panely jsou tvořeny směsí 40 % etylenu a molekulárně uzavřených parafinových

vosků (60 %). Parafín je zalaminován oboustranně do hliníkového pláště o tloušťce 130  $\mu\text{m}$ . [17]

Mezi hlavní výrobce takových systémů je společnost DuPont s produktem nazývaným **Energain**. Panely mají široké využití, mohou být instalovány jako příčky nosné, nosné stěny a stropy. Tepelná vodivost panelu v kapalném stavu vykazuje nižší hodnotu tepelné vodivosti než v pevném skupenství. Panely jsou chemicky inertní k ostatním materiálům a lze je využít jako součást hydroizolační ochrany. [17]

Náplň Energain při teplotě do 18 °C je tvořena pouze látkami, které jsou v pevném skupenství. Když teplota překročí 22 °C, nastává fázová přeměna a vosk začíná tát. V tento daný okamžik se teplo potřebné ke změně skupenství absorbuje z místnosti do panelu. To znamená, že se teplota v interiéru dále nezvyšuje. V opačném případě, kdy teplota v místnosti klesne pod 18 °C, nastává krystalizace a teplo se uvolňuje do místnosti. Díky těmto pochodům dochází k výrazným úsporám za energie v daném objektu. [17]



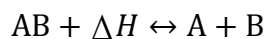
Graf 5 – porovnání akumulční kapacity betonu o objemové hmotnosti  $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (vlevo) a panelu Energain (vpravo) v závislosti na tloušťce vrstvy při teplotě 18-24 °C. Zdroj [17]

### • Interiéry a povrchové úpravy

Interiérové aplikace jsou jedny z nejúčinnějších aplikací PCM materiálů. Na jednotlivých materiálech se ukazuje snaha výrobců k tomu, aby montážníkům usnadnili jejich práci. Namísto samostatných prvků jsou vytvářeny kompatibilní systémy prvků z PCM. V dnešní době lze využít materiály s látkovou přeměnou jako například sádkartón, plastové pohledy, nátěry, obklady nebo žaluzie. [17]

### 3.3. Akumulace s využitím reakčního tepla

Pro akumulaci energie se využívá rovněž vratných chemických reakcí. V jednom směru se jedná o reakci endotermickou, která je spojena s jímáním a akumulací tepla a v opačném směru jde o reakce exotermickou s uvolněním tepla. Tento děl lze popsat rovnicí:



kde:  $\Delta H$  je reakční teplo [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

Přivedením reakčního tepla  $\Delta H$  lze sloučeninu AB rozložit na dvě samostatné látky A a B. Produkty reakce A a B musí být snadno separovatelné a nepodléhat dalším reakcím. Složky AB a A jsou zpravidla v pevném nebo kapalném skupenství, látka B je zpravidla plyn. Množství akumulovaného tepla je dáno vztahem:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H$$

kde:  $\Delta H$  je reakční teplo [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

$a_r$  je reagující podíl látky

$m$  je hmotnost látky [kg]

$Q$  je teplo [J]. [18]

Akumulace s využitím chemických reakcí je náročný energetický proces a hustoty akumulace jsou v rozmezí od 1000 do 3000  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ . Produkty reakce jsou uschovávány při pokojové teplotě (bez ztrát, bez nutnosti tepelné izolace, citelné teplo je nepoměrně menší vzhledem k reakčnímu). V praxi se uplatňuje především rozklad hydridů kovů, oxidů nebo peroxidů, ale pouze pro solární tepelnou techniku za relativně vysokých teplot. Při akumulaci s využitím vratných chemických reakcí se vyskytuje řada problémů, zejména špatná stabilita, reverzibilita, životnost, tlaky v reaktoru, koroze a toxicita. [18]

Tabulka 5 – látky pro akumulaci s využitím reakčního tepla

Reakce materiálů			Hustota akumulace [ $\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	Teplota reakce [°C]
AB	A	B		
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	$\text{MgSO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	2,8	122
$\text{FeCO}_3$	$\text{FeO}$	$\text{CO}_2$	2,6	180
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	$\text{FeO}$	$\text{H}_2\text{O}$	2,2	150
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	1,4	89

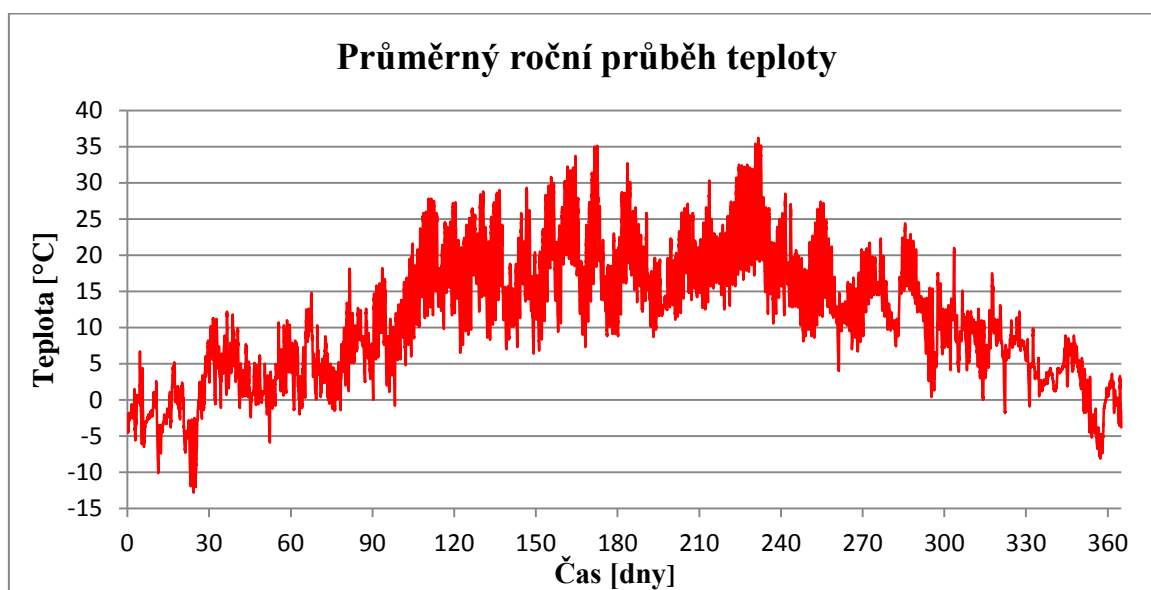
Zdroj [18]

### III. Experimentální část

#### 1. Klimatické podmínky

Výpočtový experiment vychází z klimatických dat měřených po 15 minutách, které charakterizují klimatické podnebí za posledních 20 let v brněnské lokalitě. Díky těmto údajům je možno předpokládat, jak se v dané části roku bude chovat počasí. Podle těchto podkladů lze simulovat fungování energetického zásobníku pro dlouhodobé ukládání energie.

Jedním z faktorů, které ovlivňují fungování takového zásobníku je teplota venkovního prostředí, jenž určuje v daném období spotřebu energie v objektu, která je spotřebovávána na jeho vytápění a na ohřev vody. Graf 6 je sestaven z naměřených dat charakterizujících průměrný roční průběh teploty. Tento průběh je základem k odhadu potřebné energie.

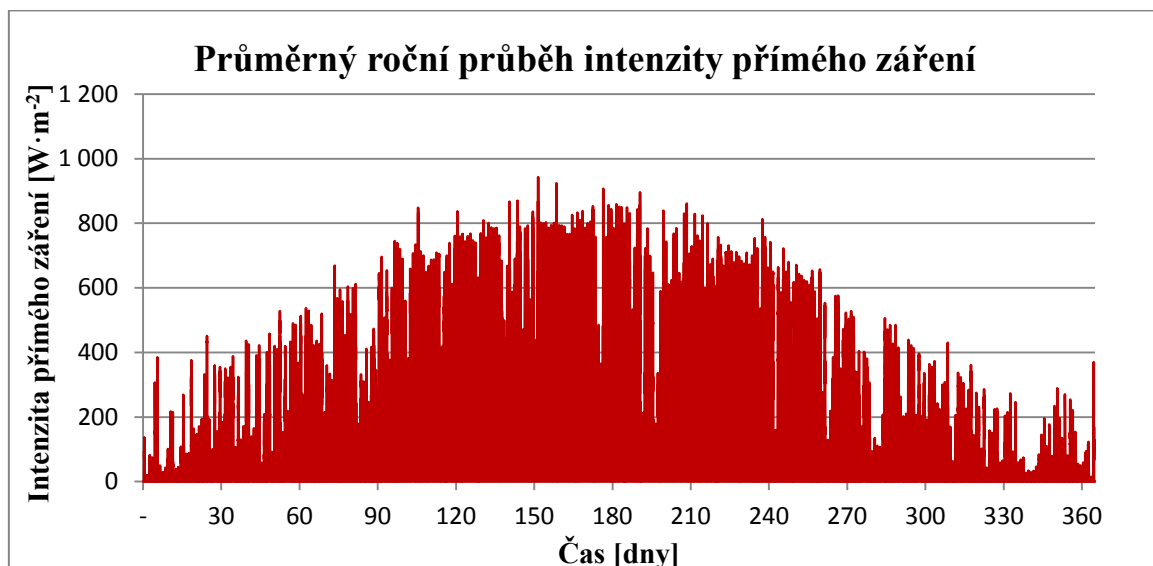


Graf 6 – Průměrný roční průběh teploty v klimatických podmínkách Brna.

#### 2. Intenzita přímého slunečního záření

Intenzita slunečního záření je další důležitý parametr, který ovlivňuje především nabíjení a vybíjení energetického zásobníku. Pro fungování systému, který ukládá dlouhodobě energii, je třeba správně dimenzovat sklon kolektorových ploch, aby co nejvíce paprsků přímého záření bylo pohlceno.

Měření intenzity přímého záření bylo provedeno v průběhu roku každých 15 minut na plochu  $1 \text{ m}^2$ . Nejvyšší hodnoty intenzity záření byly naměřeny v letním období. Nejmenší pak naopak v zimním období. Celkový průběh je dokumentován v grafu 7.



Graf 7 – Průměrný roční průběh intenzity přímého záření v klimatických podmínkách Brna. Zdroj

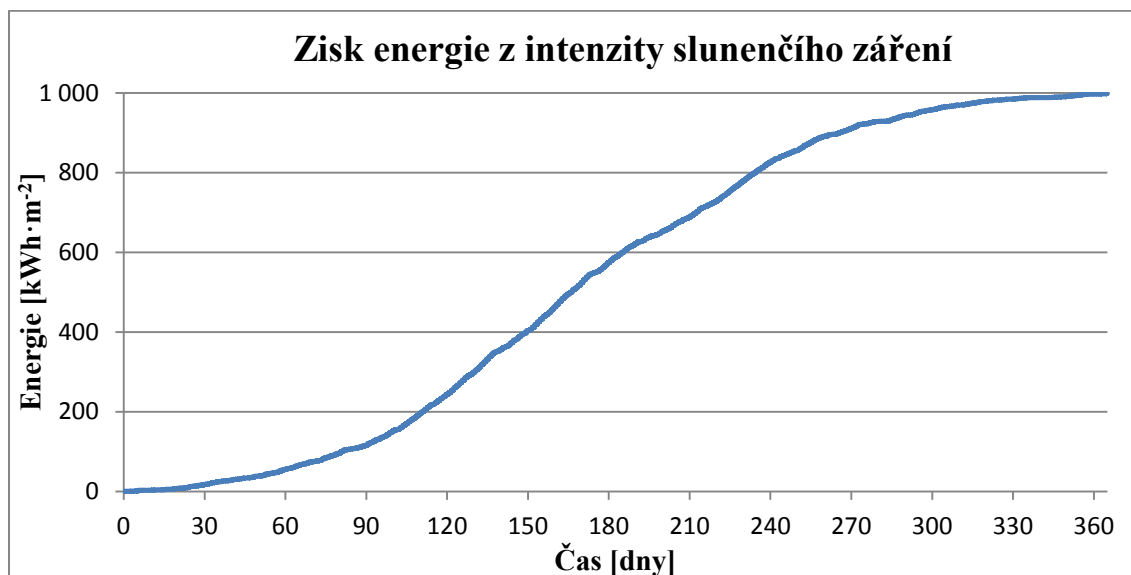
## 2.1. Energie získaná z intenzity přímého záření

Při započtení získané sluneční energie byl brán v úvahu fakt, že při intenzitě slunečního záření nižší než  $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  nelze získat účinně energii. Z toho důvodu byly započítány pouze hodnoty nad touto hranicí. Zisk za každý měsíc a celkový zisk energie za rok je přehledný v tabulce.

Tabulka 6 – Zisk energie na  $\text{m}^2$  za daný měsíc.

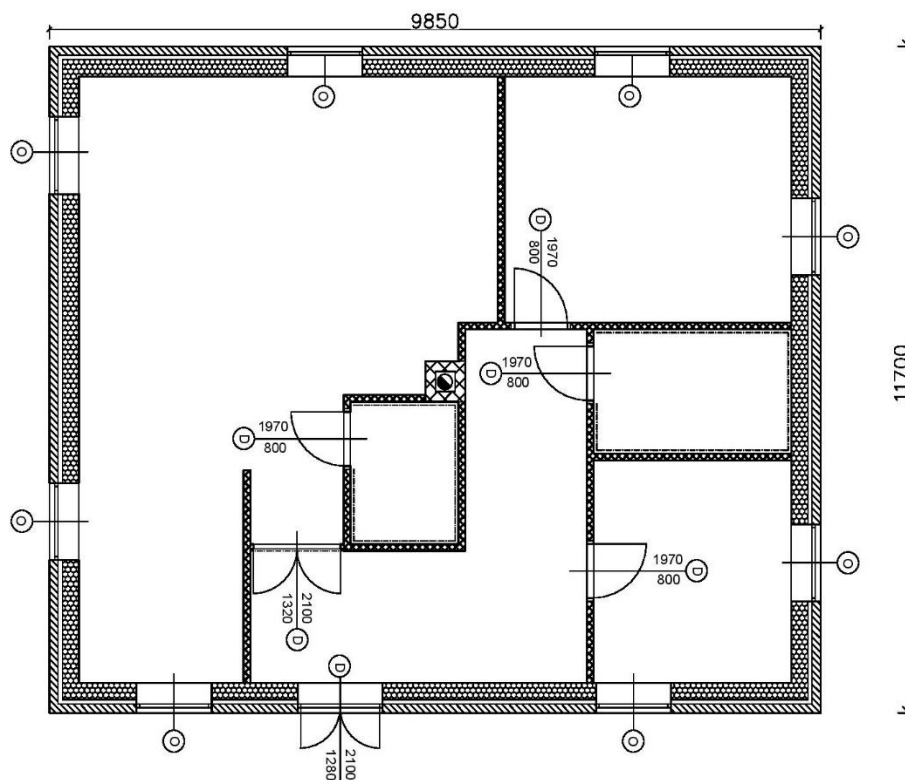
Měsíc	Energie [MJ·m <sup>-2</sup> ]	Energie [kWh·m <sup>-2</sup> ]	Měsíc	Energie [MJ·m <sup>-2</sup> ]	Energie [kWh·m <sup>-2</sup> ]
Leden	66,06	18,35	Červenec	405,93	112,75
Únor	128,51	35,69	Srpen	494,92	137,47
Březen	286,57	79,60	Září	312,35	86,76
Duben	460,76	127,98	Říjen	157,60	43,77
Květen	585,70	162,69	Listopad	91,00	25,27
Červen	625,35	173,70	Prosinec	45,44	12,62
Celková energie přijatá za rok				3593,81	998,28

Z tabulky je patrné, že největší množství získané energie z intenzity slunečního záření bylo získáno v měsících uprostřed roku. Podrobnější popis zisku energie během roku je viditelný v grafu 8.



Graf 8 – Závislost získané energie na čase.

### 3. Vybraný objekt k simulaci



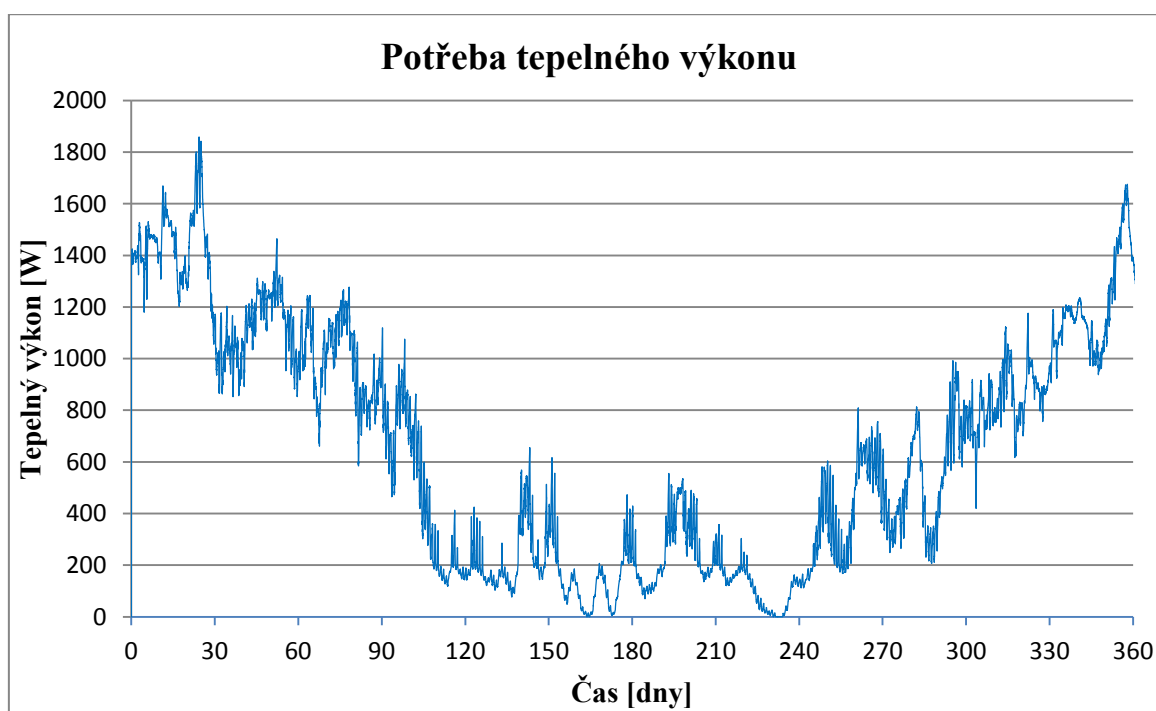
Obrázek 19 – Půdorys objektu k simulaci v Bohuticích. Zdroj [vlastní]

Vybraný objekt je situován v Bohuticích, který se nachází přibližně 28 km jihozápadně od Brna. Zde mohou být mírně odlišné klimatické podmínky, ale k provedení simulace budou brány v úvahu klimatické podmínky Brna. V případě posuzovaného objektu se jedná o dřevostavbu, která je výborně zateplená i v konstrukci podlahy a stropu, s měděnou střešní krytinou. Vnitřní příčky jsou zděné.

**Tabulka 7 – Skladba obvodových stěn objektu.**

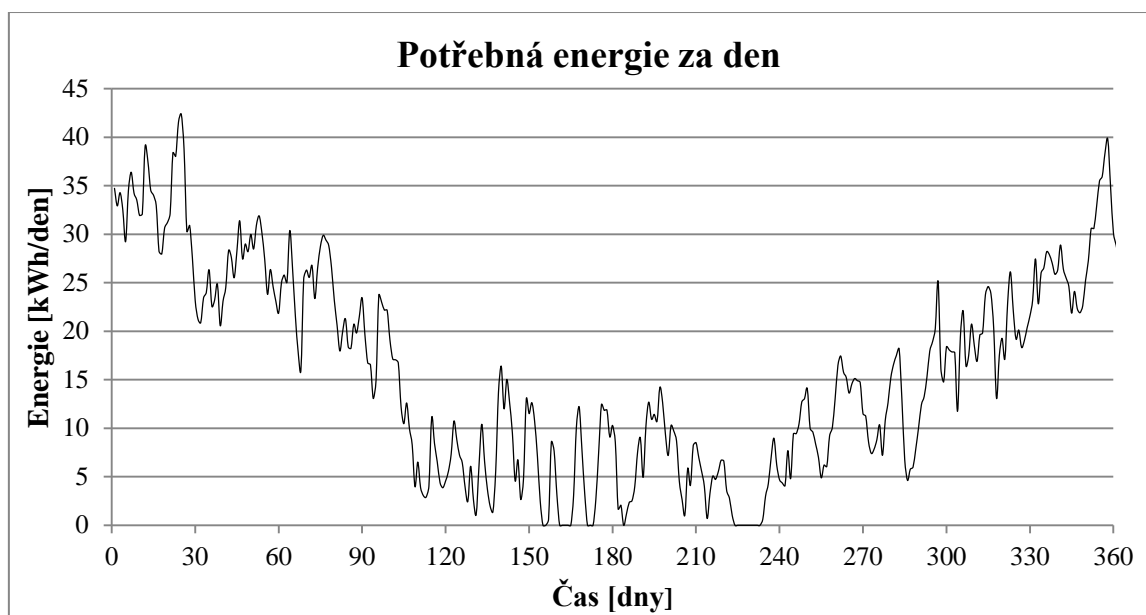
Skladba	Tloušťka [mm]
Dřevěná obvodová stěna	130
Vzduchová mezera	40
OSB deska	12
Tepelná izolace EPS	250
OSB deska	12

Na objektu bylo v průběhu roku měřena potřeba tepelného výkonu po 15 minutách. Díky těmto datům je možné vypočítat potřebu energie, kterou je nutno dodávat k zajištění tepelné pohody v průběhu roku. Její hodnota ve finální fázi dosáhla hodnoty **5742,6 kWh/rok**. Hodnoty tepelného výkonu se během dne pohybovaly v řádech několika kW. Průběh potřeby tepelného výkonu je znázorněn v grafu 9.



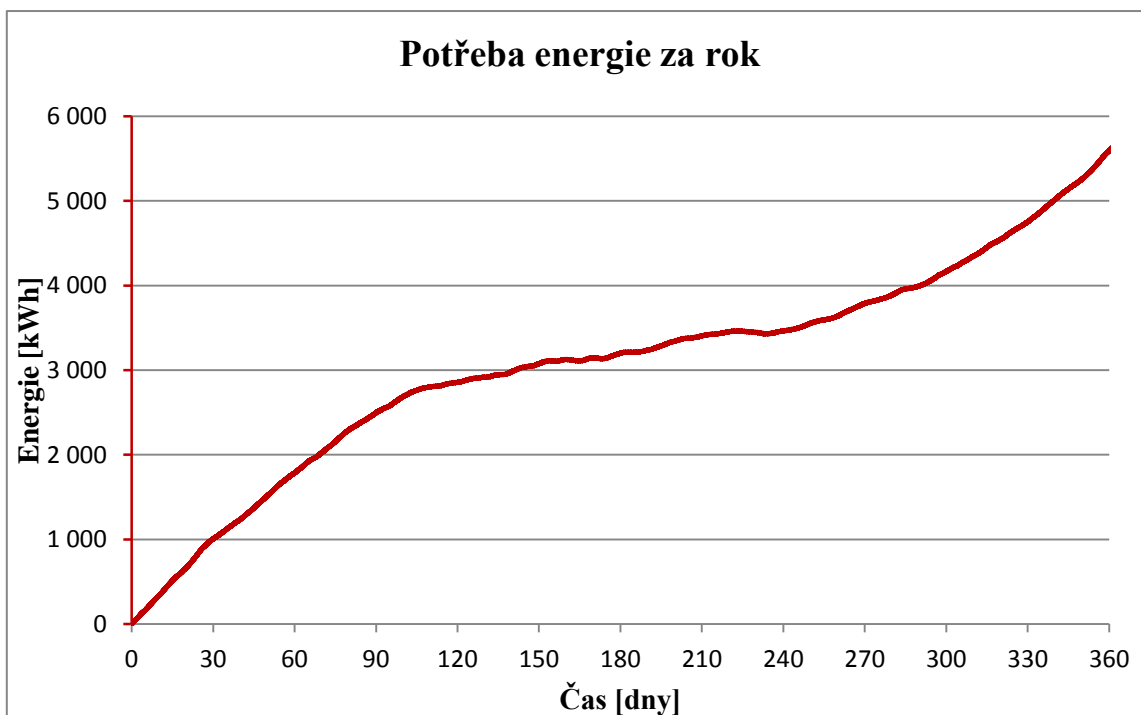
Graf 9 – Průběh potřeby tepelného výkonu v průběhu roku.

Průběh potřebné energie na jednotlivý den je znázorněn v grafu 10.



Graf 10 – Potřebná energie na jednotlivý den v průběhu roku.

Z grafu je patrné, že nejvyšší spotřeba energie nastává v zimním období. Pro stanovení celkového množství energie, které je potřeba pro daný objekt, se hodnoty za každý den sečtou. Průběh rostoucí potřeby energie za rok je viditelný v grafu 11.



Graf 11 – Časová závislost zvyšující se potřeby energie v průběhu roku.



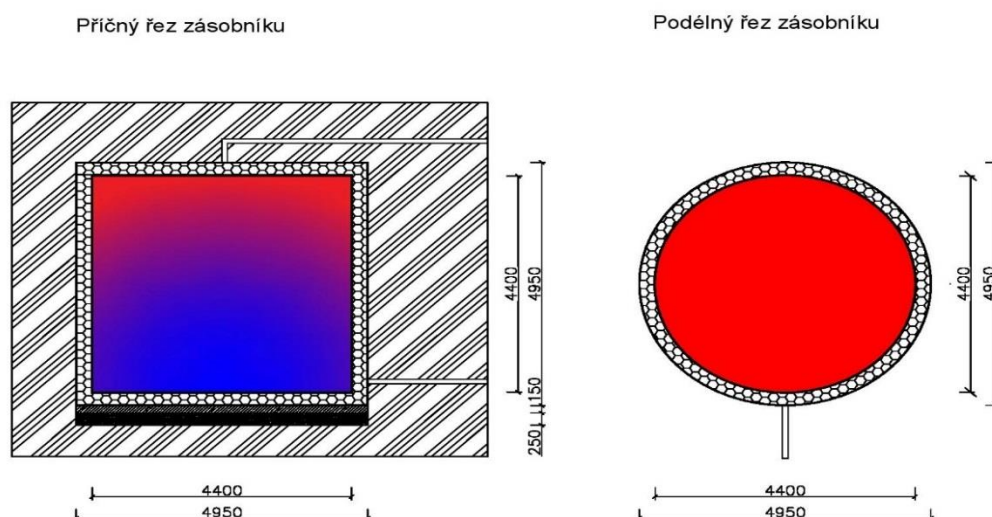
#### 4. Dimenzování energetického zásobníku

Geometrický tvar zásobníku je válec, jehož poloměr a výška je v poměru 1:2. Materiály pro konstrukci jsou plechy, polyuretan, polystyren a parotěsná fólie z vnitřní strany zásobníku. Jako teplotnosné médium je využívána voda. Celková kolektorová plocha, která se skládá z vakuových trubicových kolektorů s pohltivostí přímého slunečního záření 93 %, je 43 m<sup>2</sup>.

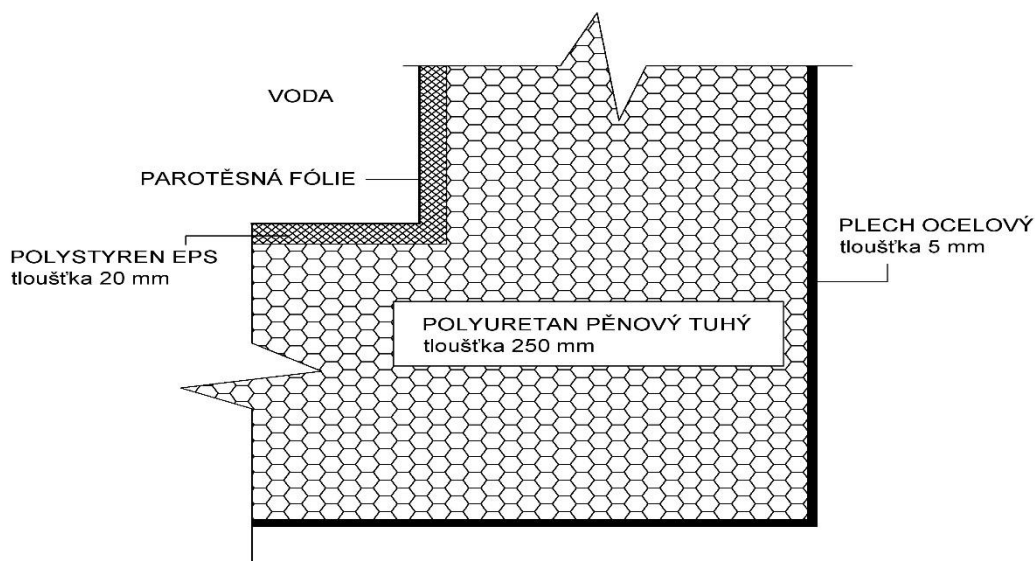
Tabulka 8 – Charakteristika materiálů pro konstrukci zásobníku.

Materiál	Polystyren EPS	Polyuretan pěnový tvrdý	Plech ocelový
Tloušťka [m]	0,02	0,25	0,005
Plocha [m <sup>2</sup> ]	92,85	114,9	115,4
$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,037	0,022	50
$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	30	35	7850

Celkové zatížení zásobníku s vodou je 53,16 kN·m<sup>-2</sup>. Vzhledem k únosnosti zeminy je to příznivé, ale i přesto je navržena podkladní vrstva, která se skládá z 250 mm stěrkového násypu a 150 mm podkladního betonu C 16/20. Zásobník je umístěn do země. Při realizaci konstrukce může nastat problém s podzemní vodou.



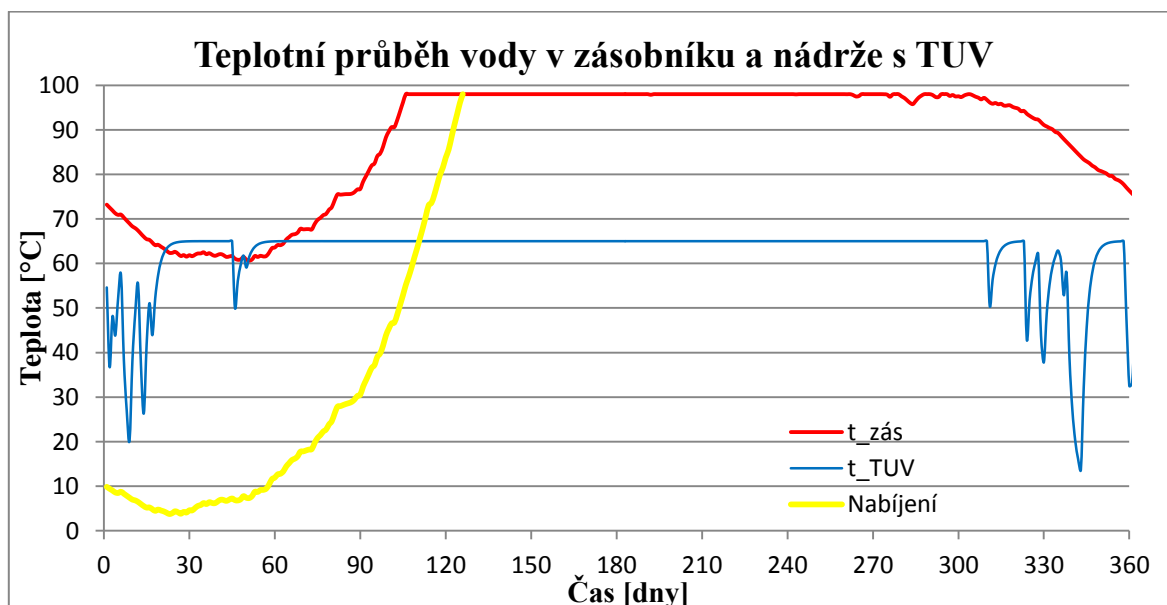
Obrázek 20 – Schéma příčného a podélného řezu zásobníku s vodou. Zdroj [vlastní]



Obrázek 21 – Bližší materiálové uspořádání konstrukce zásobníku.

## 5. Energetická účinnost teplovodního zásobníku

Horní hranice teploty vody v zásobníku je 98 °C. Při dosažení této teploty se pozastaví čerpadla, která řídí oběh vody mezi kolektory, zásobníkem a otopnou soustavou. Součástí systému je i 200 litrová nádrž s vodou, která slouží k uchování teplé vody k užitku obyvatel objektu. Její maximální teplota je 65 °C. Vypočtené hodnoty chování zásobníku i nádrže s teplou vodou jsou zřetelné v grafu 12:



Graf 12 – Teplotní průběh vody v zásobníku a nádrže s TUV v průběhu roku.

Pokud zásobník bude uveden do provozu na začátku kalendářního roku, nelze předpokládat jeho okamžité fungování. Voda v zásobníku se v průběhu prvních týdnů ohřívá, až při 121 dnu nabude maximální teploty. Červená křivka v grafu představuje průběh teploty v zásobníku. První polovina hodnot je uvažována jako z následujícího půlroku, pokud by intenzita přímého záření byla v dalším roce stejná.

## 6. Ekonomická bilance systému pro dlouhodobé ukládání energie

Tabulka 9 – Odhadované náklady na realizaci systému pro dlouhodobé ukládání energie.

<b>Výkopové práce</b>	
Výkop pásovým rypadlem CAT 304 CR (1 den) + doprava stroje	6 000 Kč
Odvoz zeminy	25 000 Kč
<b>Materiály</b>	
Polystyren ISOVER GREYWALL	29 440 Kč
Polyuretanová pěna tvrdá	110 680 Kč
Plech ocelový černý	92 650 Kč
Voda do systému	6 000 Kč
Podkladní betonáž	7 500 Kč
Podkladní stěrkový násyp	8 000 Kč
<b>Ostatní komponenty soustavy</b>	
Čerpadlo, potrubí, pojistná a regulační zařízení	20 000 Kč
Kolektory (vakuové trubicové ADUDARY)	228 640 Kč
<b>Celková cena</b>	<b>533 910 Kč</b>

## 7. Diskuse výsledků

Tepelný zásobník byl dimenzován tak, aby teplota uvnitř neklesala v průběhu roku pod 60 °C. Vzhledem k tomuto faktu se musí navrhnout patřičná otopná tělesa v objektu. V grafu 12 je zřetelné, že nelze udržet po celý v 200 litrové nádrži potřebnou teplotu vody určené k užitku. Proto je třeba navrhnout i jiný zdroj ohřevu užitkové vody, který bude využíván především v zimním období. Při výpočtech nebyly brány v úvahu tepelné ztráty potrubím.

Ekonomická bilance je hrubý odhad cenové dostupnosti systému, ve které nejsou započítány manuální práce a instalace potřebných zařízení. Ve skutečnosti může být cena poněkud odlišná.

## IV. Závěr

V souladu se zadáním jsou v bakalářské práci rozebrány komponenty solárních soustav a principy akumulace tepla, které se liší ve fyzikálně chemických principech a velikostech hustoty akumulovaných energií. Nejpoužívanějším a v celku jednoduchým způsobem je akumulace citelného tepla. Nejpříznivější pracovní látkou se jeví voda, protože má největší tepelnou kapacitu a je všude dostupná a cenově přijatelná. Také lze využít tepelnou kapacitu kameniv, která ovšem nedosahuje takových hodnot jako u vody. Výhodou systémů s kamenivem je jednodušší konstrukce zásobníku. U akumulace s využitím latentního tepla se uplatňuje skupenské teplo tání/tuhnutí. Největší výhodou tohoto způsobu ukládání energie je, že při fázové změně skupenství zůstává konstantní teplota až do doby, než proběhne celá změna skupenství. Také dosahuje vyšších hodnot hustoty akumulované energie než akumulace s využití citelného tepla. Jako teplonosná média jsou nejčastěji používány tzv. PCM materiály, které mají výborné fyzikálně-mechanické, kinetické a chemické vlastnosti jako např. vysoká tepelná vodivost v obou skupenstvích, vysoká tepelná kapacita nebo velké latentní teplo tání. Tyto materiály nachází v praxi uplatnění i jako stavební materiály. Poslední systém, který je v bakalářské práci popsán, je princip vratných chemických reakcí, které jsou doprovázeny uvolňováním a jímáním tepla. K největším výhodám tohoto způsobu patří bezztrátové ukládání tepla a vysoká hustota akumulované energie. Oproti dvěma předešlým způsobům je tento způsob v usilovném vývoji.

V experimentální části je popsána simulace zásobníku na konkrétní vybraný objekt. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o simulaci, nelze s jistotou hovořit o bezproblémové funkčnosti a ekonomické výhodě systému. K tomu by musela být provedena realizace, kde by byly brány v úvahu všechny tepelné ztráty. Následně by mohlo být provedeno srovnání teoretické funkčnosti a funkčnosti v praxi. Protože ceny energií budou stále více ekonomicky nákladnější, jeví se budování solárních systémů s velkým potenciálem do budoucna.

## V. Použitá literatura a zdroje

- [1] ŠKORPÍK, Jiří, *Sluneční záření jako zdroj energie* [online]. [cit. 2017-02-16]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/02.html#menu>
- [2] MOKŘIŠ, L. 2011. *Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách*. Bakalářská práce. VUT FIS Brno. Vedoucí práce Ing. Pavel Charvát, Ph.D.
- [3] LADENER, Heinz a Frank SPÄTE, 2003. *Solární zařízení*. 1. Praha: Grada Publishing. ISBN 80-247-0362-9
- [4] Typy solárních kolektorů, *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/154-typy-solarnich-kolektoru>
- [5] SOUKUP, Tomáš, 2012. *Využití změny skupenství při akumulaci tepla v solárních vzduchových systémech*. Brno. Diplomová. VUT FSI. Vedoucí práce Ing. Pavel Charvát, Ph.D.
- [6] MUNTINGER, Karel a Jan TRUXA, 2010. *Solární energie pro váš dům*. 3. Brno: Computer press. ISBN 978-80-251-3241-8.
- [7] Zásobníky tepla, 2004. *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>
- [8] Zásobníky tepla s řízeným teplotním vrstvením (stratifikací), *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>
- [9] Zásobníky pro dlouhodobé ukládání energie, 2006. *Topenářství instalace* [online]. 4 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.topin.cz/download.php?idx=72217&di=7>
- [10] Prvky solárních soustav a jejich navrhování, 2011. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. Praha [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: [https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/AZE/P4-prvky\\_solarnich\\_soustav.pdf](https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/AZE/P4-prvky_solarnich_soustav.pdf)
- [11] Potrubí solárních soustav, *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/150-potrubí-solarnich-soustav>
- [12] Oběhová čerpadla a hydraulika solárních soustav, *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/2563-obehova-cerpadla-a-hydraulika-solarnich-soustav-i>
- [13] Solární soustavy - teorie a schémata (VII), 2005. *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2726-solarni-soustavy-teorie-a-schemata-vii>
- [14] CABEZA, Louisa F., 2015. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. 1. Cambridge: Woodhead publishing. ISBN 978-1-78242-088-0.

[15] DINCER, Ibrahim, 2010. *Thermal energy storage: Systems and applications*. 2. New York: WILEY. ISBN 978-0-470-74706-3.

[16] PCM ve stavebnictví Díl 1: Základní charakteristiky PCM, 2011. *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>

[17] PCM ve stavebnictví Díl 2: PCM jako stavební materiál - možnosti aplikace, 2011. *TZB-INFO* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7381-pcm-ve-stavebnictvi-dil-2-pcm-jako-stavebni-material-moznosti-aplikace>

[18] MATUŠKA, Tomáš, 2013. *Solární zařízení v příkladech*. 1. Praha: Grada publishnig. ISBN 978-80-247-3525-2.

## VI. Seznam použitých zkratek a symbolů

$I$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	celková intenzita slunečního záření
$I_P$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	intenzita přímého slunečního záření
$I_D$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	intenzita difuzního slunečního záření
$V$	$[\text{m}^3]$	objem pracovní látky
$\rho$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota pracovní látky
$t_{1,2}$	$[^\circ\text{C}]$	teploty na počátku a na konci uvolňování tepla
$c$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita pracovní látky
$Q$	$[\text{J}]$	teplo
$T$	$[^\circ\text{C}]$	teplota vody
$\lambda$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti vody
$l_t$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	skupenské teplo tání/tuhnutí
$t_t$	$[^\circ\text{C}]$	teplota tání/tuhnutí
$\Delta H$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	reakční teplo
$a_r$	$[-]$	reagující podíl látky reakční teplo
$m$	$[\text{kg}]$	hmotnost látky